

**USO DE TECNICAS ELECTROQUIMICAS PARA EVALUAR INHIBIDORES DE
CORROSION USADOS EN POZOS DE CAMPOS PETROLEROS**

JAVIER MAURICIO FERNANDEZ MOJICA
Código Estudiantil: 201615287

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA Y PEDAGÓGICA DE COLOMBIA
ESCUELA DE POSGRADOS DE INGENIERIA
MAESTRIA EN GESTIÓN DE INTEGRIDAD Y CORROSIÓN
TUNJA
2018

**USO DE TECNICAS ELECTROQUIMICAS PARA EVALUAR INHIBIDORES DE
CORROSION USADOS EN POZOS DE CAMPOS PETROLEROS**

JAVIER MAURICIO FERNANDEZ MOJICA
Código Estudiantil: 201615287

Trabajo de grado para optar al título de:
Maestría en Gestión de Integridad y Corrosión

Director de Trabajo de grado
PhD. Enrique Vera Lopez, Doctor en ingeniería con énfasis en corrosión

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA Y PEDAGÓGICA DE COLOMBIA
ESCUELA DE POSGRADOS DE INGENIERIA
MAESTRIA EN GESTIÓN DE INTEGRIDAD Y CORROSIÓN
TUNJA
2018

RESUMEN

Esta investigación trata de la evaluación del comportamiento de tres clases de inhibidores de corrosión en un sistema de inyección, para su utilización en la industria petrolera simulando las condiciones de operación de un pozo de inyección y utilizando cada uno de los tres inhibidores con dosificaciones de (0, 10 y 30 partes por millón (ppm)) sometidos a temperatura de 80°C y concentraciones de Oxígeno [0 y 5 ppm].

Para lograr estos alcances se recurrirá al empleo de técnicas electroquímicas (resistencia a la polarización lineal, pruebas de polarización Tafel y Espectroscopia de Impedancia Electroquímica) determinando las velocidades de corrosión en un acero API N 80 mediante los parámetros establecidos en la norma **ASTM G 102**, y así evaluar el comportamientos de cada producto mediante el cálculo de eficiencias siguiendo los lineamientos de la norma **ASTM G 170**.

Se desarrolló un blanco para evaluar el efecto de los inhibidores a temperatura ambiente y comparar su comportamiento con las pruebas desarrolladas a 80°C, esta temperatura es crítica para un inhibidor dado que a temperaturas mayores cambia sus propiedades químicas y deja de comportarse como inhibidor, esta temperatura fue considerada en la investigación dado que es la máxima temperatura que puede obtenerse en los pozos de inyección.

Los resultados muestran que en ausencia de concentración de oxígeno, 80 °C y dosificación de 10 ppm de inhibidor, se encuentran eficiencias de inhibición cercanas al 70% y hasta 85% considerando aceptables por estar en la temperatura límite de efectividad del inhibidor.

La eficiencia aumentó al incrementar la dosificación del inhibidor de corrosión de 10 a 30 ppm, temperatura a 80°C y en ausencia de oxígeno. El inhibidor LA-3518-C, presenta un comportamiento más favorable para contrarrestar mecanismos de corrosión, seguido por el inhibidor 97-VD-129 y por último el inhibidor VX-12615.

Cuando se enriquece con oxígeno a 5 ppm las condiciones de evaluación de los inhibidores a 80°C y dosificación de 10 ppm de inhibidor, se ve desfavorecida la inhibición obteniendo eficiencias de 65% a 80%, lo cual establece que el inhibidor tiene un desempeño débil cuando se encuentra en presencia de oxígeno.

En las condiciones anteriores pero aumentando la dosificación del inhibidor a 30 ppm se genera un incremento de eficiencia, estableciendo que para condiciones críticas se podría elevar la concentración de inhibidor permitiendo cubrir un área mayor de protección.

CONTENIDO

	pág.
RESUMEN.....	3
INTRODUCCION.....	10
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	11
1.1 EL PROBLEMA	11
1.2 JUSTIFICACIÓN	16
1.3 OBJETIVOS	17
1.3.1 Objetivo general.....	17
1.3.2 Objetivos específicos.	17
2. MARCO TEORICO	18
2.1 RESISTENCIA A LA POLARIZACIÓN LINEAL	18
2.2 DIAGRAMA DE TAFEL	20
2.3.1 Introducción..	23
2.3.2 Que es la Impedancia?.	23
2.3.3 Reseña.....	24
2.3.3.1 Análisis Vectorial..	25
2.3.4 Elementos de Circuito Equivalentes.	28
2.3.5 Análisis Gráfico.....	29
2.3.6 Diagramas de Impedancia.	32
2.3.7 Instrumentación	39
3. ESTADO DEL ARTE	41
3.1 EFECTO DEL OXÍGENO EN LA CORROSIÓN	41
3.2 TÉCNICAS PARA EVALUACIÓN DE INHIBIDORES	45
3.3 TRATAMIENTOS QUÍMICOS EN POZOS DE INYECCIÓN	47
3.3.1 Productos químicos para el tratamiento de aguas de inyección.	48
3.3.2 Productos químicos para mantener inyectividad en pozos disposal.....	51
3.3.3 Tratamientos con Gelificación Insitu.	52
4. MARCO METODOLOGICO	53
4.1 ETAPAS	53
4.1.1 Etapa I. Obtención, preparación de probetas.....	53

4.1.2	Etapa II. Preparación de soluciones inhibidoras	53
4.1.3	Etapa III. Montaje de celda electroquímica a nivel laboratorio	54
4.1.4	Etapa IV. Pruebas electroquímicas.	54
4.1.5	Etapa V. Análisis morfológico superficial por microscopia.	55
4.1.6	Etapa VI. Elaboración y presentación productos de difusión.	55
4.2	DISEÑO EXPERIMENTAL	55
4.2.1	Realización de pruebas de simulación en laboratorio	55
4.2.2	Evaluación de Inhibidores de corrosión.	56
5.	METODOLOGIA Y RESULTADOS	60
5.1	METODOLOGÍA	60
5.1.1	Caracterización del material	60
5.1.1.1	Caracterización metalográfica	60
5.1.1.2	Determinación de resistencia mecánica.	61
5.1.1.3	Análisis de microdureza	62
5.1.1.4	Determinación de composición química.	62
5.1.2	Preparación de probetas	63
5.1.2.1	Probetas electroquímicas	64
5.1.3	Diseño experimental	64
5.1.4	Procedimiento para realizar una prueba	64
5.2	RESULTADOS	65
5.2.1	Caracterización del material	65
5.2.1.1	Composición química	65
5.2.1.2	Ensayo de tracción	66
5.2.1.3	Microdurómetro	68
5.2.1.4	Microestructura	68
5.2.2	Técnicas electroquímicas para determinar la eficiencia de inhibición. ..	69
5.2.2.1	Construcción de curvas de polarización Tafel	69
5.2.2.2	Construcción de curvas de resistencia a la polarización lineal....	70
5.2.4	Espectroscopía de impedancia electroquímica	74
5.2.5	Análisis gráfico de los resultados obtenidos	77
5.2.5.1	Eficiencias de inhibición a partir de Tafel y LPR	77
5.2.5.2	Eficiencias de inhibición a partir de EIS	80
5.2.6	Apariencia superficial de las probetas	82

6. CONCLUSIONES	84
7. RECOMENDACIONES	85
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	86
ANEXO A. ESQUEMAS DE COMPLETAMIENTO DE LOS POZOS DE INYECCION	89

LISTA DE TABLAS

pág.

Tabla 1. Resultados de análisis fisicoquímicos del agua de inyección en cabeza de pozo de agosto de 2017 en 3 pozos uno por cada campo.	13
Tabla 2. Resultados de análisis fisicoquímicos del agua de inyección en cabeza de pozo de agosto de 2017 en 3 pozos uno por cada campo.	13
Tabla 3. Velocidades de corrosión de las aguas de inyección en cabeza de pozo de agosto de 2017 en 3 pozos uno por cada campo por LPR.	15
Tabla 4. Diagrama de las etapas metodológicas del proyecto.	53
Tabla 5. Resumen de las pruebas de evaluación de los 3 inhibidores en laboratorio	55
Tabla 6. <i>Detalle del total de combinaciones a desarrollar en las pruebas de laboratorio para los 3 inhibidores de la muestra de agua del pozo CCS-A12.....</i>	<i>57</i>
Tabla 7. Detalle del total de combinaciones a desarrollar en las pruebas de laboratorio para los 3 inhibidores de la muestra de agua del pozo TRS-N2	58
Tabla 8. Detalle del total de combinaciones a desarrollar en las pruebas de laboratorio para los 3 inhibidores de la muestra de agua del pozo JGR-12.....	58
Tabla 9. Análisis de composición por espectrómetro de chispa	66
Tabla 10. Composición química aceros. Norma API SPC 5CT.	66
Tabla 11. Prueba de dureza acero API N-80.....	68
Tabla 12. Resultado de las velocidades de corrosión por LPR y Tafel.....	72
Tabla 13. Resultado de las pruebas con inhibidor y determinación de eficiencia de inhibición.....	73
Tabla 14. Determinación de eficiencia de inhibición en el fluido CCS-A12.	76
Tabla 15. Determinación de eficiencia de inhibición en el fluido TRS-12.	76
Tabla 16. Determinación de eficiencia de inhibición en el fluido JGR-12.	76
Tabla 17. Apariencia superficial probetas con inhibidor LA-3518-C.	82
Tabla 18. Apariencia superficial probetas con Inhibidor VX-12615.	83
Tabla 19. Apariencia superficial Inhibidor 97-VD-129.....	83

LISTA DE FIGURAS

pág.

Figura 1. Diagrama de Flujo de Proceso de la Planta de Agua en la estación Jaguar a marzo de 2018, el sistema de Nitrógeno no está instalado.	12
Figura 2. Velocidad de corrosión en la succión de bombas booster del agua de inyección de Caracara Sur.....	14
Figura 3. Velocidad de corrosión en la succión de bombas booster del agua de inyección de Jaguar.	14
Figura 4. Velocidad de corrosión en la succión de bombas booster del agua de inyección de Torosentado.....	15
Figura 5. Un gráfico típico de Resistencia a la Polarización Lineal.....	19
Figura 6. Un diagrama de Tafel típico catódico.....	21
Figura 7. Diagrama de Tafel combinado anódico y catódico	22
Figura 8. Formas de ondas AC para un potencial aplicado y una corriente resultante	25
Figura 9. Vector en términos de coordenadas X y Y.....	26
Figura 10. Vector en términos de ángulo (θ) and Magnitud ($ Z $).....	26
Figura 11. Vector en términos de coordenadas Real I' e Imaginaria I''	26
Figura 12. Circuito equivalente para una celda electroquímica simple	29
Figura 13. Circuito equivalente para un metal recubierto con una película porosa no conductora.....	31
Figura 14. Circuito Equivalente para una reacción electroquímica acoplada a una reacción química.....	31
Figura 15. Diagrama de Nyquist para un Sistema Electroquímico Simple	32
Figura 16. Diagrama de Bode para un Sistema Electroquímico Simple.....	34
Figura 17. Diagrama de Nyquist para una celda de tiempo constante.....	35
Figura 18. Diagrama de Bode para una celda constante de dos tiempos (Impedancia vs. Frecuencia).....	36
Figura 19. Diagrama de Bode para una celda constante de dos tiempos (fase angular vs. Frecuencia)	36
Figura 20. Diagrama de Bode para los valores seleccionados de $R\Omega$ (Impedancia vs. Frecuencia)	37
Figura 21. Diagrama de Bode para los valores seleccionados de $R\Omega$ (Fase Angular vs. Frecuencia)	37
Figura 22. Diagrama de Nyquist para diferentes valores de $R\Omega$	37
Figura 23. Diagrama de Nyquist del hierro en 0,1 N H_2SO_4 des aireado después de 4 horas de inmersión.	38
Figura 24. Representación esquemática de la instrumentación utilizada en estudios de EIS. A = electrodo auxiliar, T = electrodo de trabajo, R = electrodo de referencia.	39
Figura 25. Tasa de corrosión como una función de la concentración de oxígeno disuelto y la tasas de flujo de inyección producto del modelo mecanístico.....	42

Figura 26. Tasa de corrosión como una función de la concentración del oxígeno disuelto y la temperatura del fluido a 7m/s de tasa de flujo, producto de un modelo mecanístico.....	43
Figura 27. Comparación de modelos mecanístico, erosión – corrosión con un modelo semi-empírico para una tasa de flujo de inyección de 1 m/s.....	44
Figura 28. Comparación de modelos mecanístico, erosión – corrosión con un modelo semi-empírico para una tasa de flujo de inyección de 1 m/s.....	44
Figura 29. Empleo de productos químicos en la producción de petróleo.....	48
Figura 30. Electrodo de anillo rotatorio.	54
Figura 31. Muestras de 3 pozos inyectoros de 3 zonas diferentes del campo Caracara	56
Figura 32. Muestras de 3 inhibidores base agua a evaluar en laboratorio.....	56
Figura 33. Pulidora Dace Technologies NANO 200 DT.	60
Figura 34. Microscopio óptico Carl Zeiss Axiotech.....	61
Figura 35. Máquina universal de ensayos Microtest.	61
Figura 36. Probetas para máquina de tracción.	62
Figura 37. Microdurómetro digital HSV-1000.	62
Figura 38. Espectrómetro Q8 Magellan.	63
Figura 39. Diseño y medidas en mm de las probetas API N 80.....	63
Figura 40. Preparación mecánica de las probetas.	64
Figura 41. Electrodo de anillo rotatorio.	65
Figura 42. Ensayo de tracción probetas N-80.....	67
Figura 43. Esfuerzo vs Deformación de probeta acero API N-80.....	67
Figura 44. Microestructura de un acero N-80. Microscopio metalográfico, 500x..	69
Figura 45. Construcción y análisis de curvas de polarización Tafel.....	70
Figura 46. Construcción y análisis de la curva LPR.....	71
Figura 53. Espectroscopia de impedancia electroquímica. Fluido CCS-12, Temperatura 80 °C, Concentración de O ₂ de 5 ppm.....	74
Figura 54. Espectroscopia de impedancia electroquímica. Fluido TRS-N ₂ , Temperatura 80 °C, Concentración de O ₂ de 5 ppm.....	75
Figura 55. Espectroscopia de impedancia electroquímica. Fluido JGR-12, Temperatura 80 °C, Concentración de O ₂ de 5 ppm.....	75
Figura 47. Eficiencia de inhibición para una dosificación de 10 ppm de inhibidor, 0 ppm de Oxígeno y temperatura de 80 °C.....	77
Figura 48. Eficiencia de inhibición para una dosificación de 30 ppm de inhibidor, 0 ppm de Oxígeno y temperatura de 80 °C.....	78
Figura 49. Eficiencia de inhibición para una dosificación de 10 ppm de inhibidor, 5 ppm de Oxígeno y temperatura de 80 °C.....	79
Figura 50. Eficiencia de inhibición para una dosificación de 30 ppm de inhibidor, 5 ppm de Oxígeno y temperatura de 80 °C.....	80
Figura 51. Eficiencia de inhibición EIS para una dosificación de 10 ppm de inhibidor, 5 ppm de Oxígeno y temperatura de 80 °C.....	81
Figura 52. Eficiencia de inhibición EIS para una dosificación de 10 ppm de inhibidor, 5 ppm de Oxígeno y temperatura de 80 °C.....	82

INTRODUCCION

Los pozos de inyección de agua son muy críticos en los campos productores de crudo puesto que los fluidos de los pozos de producción cada vez tienen mayor corte de agua, donde se han encontrado pozos con BSW que llegan al 98% o 99%, esto significa que por cada 100 barriles de fluido, luego del procesamiento en las facilidades de superficie, se obtienen tan solo 2 barriles de crudo para venta y se tiene que manejar 98 barriles de agua que se reinyectan a la formación de acuerdo con lo estipulado en la licencia ambiental de explotación del campo requiriendo grandes cantidades de energía y a altos costos asociados.

Una limitación en la inyección, puede ser ocasionada por fallas de tuberías, disponibilidad de equipos, taponamiento de la formación receptora o disminución de la capacidad de inyección, se ve reflejada directamente en pérdidas de la producción asociada, incluso puede reflejarse en la necesidad de tener que apagar pozos productores por incapacidad para el manejo del agua. Hoy en día manejar la integridad de los sistemas de inyección (plantas de tratamiento, sistema de bombas "Booster" y principales, líneas de inyección y pozos inyectoros) es todo un reto dado que variables como las propiedades fisicoquímicas del fluido, las variables de operación como presión, temperatura, velocidad de flujo, entre otras determinan la probabilidad que se presenten en mayor o menor tasa los daños por corrosión o incrustaciones o depósitos que van con el tiempo limitando la vida útil de cada activo hasta dejarlo indisponible.

El presente trabajo muestra la evaluación de 3 inhibidores a nivel de laboratorio aplicados en muestras de aguas obtenidas de 3 diferentes pozos productores que han mostrado altas velocidades de corrosión y dominados en mayor forma por las altas concentraciones de oxígeno disuelto con las que se inyecta dado que aún en el campo este no es un proceso completamente cerrado.

Se evaluaron los inhibidores en dos dosificaciones diferentes, en un ambiente sin oxígeno y otro rico en oxígeno y a la temperatura de 80°C dado que a esta temperatura pueden llegar a ser las condiciones extremas de los pozos de inyección, para ver si su efecto inhibidor hace posible pensar en que sea una opción para implementarla en el campo y así evitar fallas por corrosión interna en el pozo inyector.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 EL PROBLEMA

En el Bloque Caracara de producción de petróleo operado por CEPSA desde el 2009 cuenta con 3 estaciones Jaguar, Torosentado y Caracara Sur, a donde llegan los fluidos producidos de más de 80 pozos para realizar en cada estación el proceso de tratamiento, para retirar el agua y ser transportado por un oleoducto hacia una cuarta estación en Mani, donde posteriormente es entregado por un oleoducto a la estación Santiago para ser transportado por terceros hasta embarcarlo en buques y venderlo; el agua retirada del proceso en cada estación es tratada y mediante un sistema de bombas y líneas de inyección el agua es reinyectada a pozos inyectoros.

Anteriormente el agua de producción se disponía en unas piscinas facultativas y de allí era tomada por bombas “Booster”, luego a bombas principales donde se incrementaba la presión y era inyectada a los pozos, favoreciendo los procesos corrosivos por la gran cantidad de oxígeno que entraba al sistema el cual no era medido ni controlado.

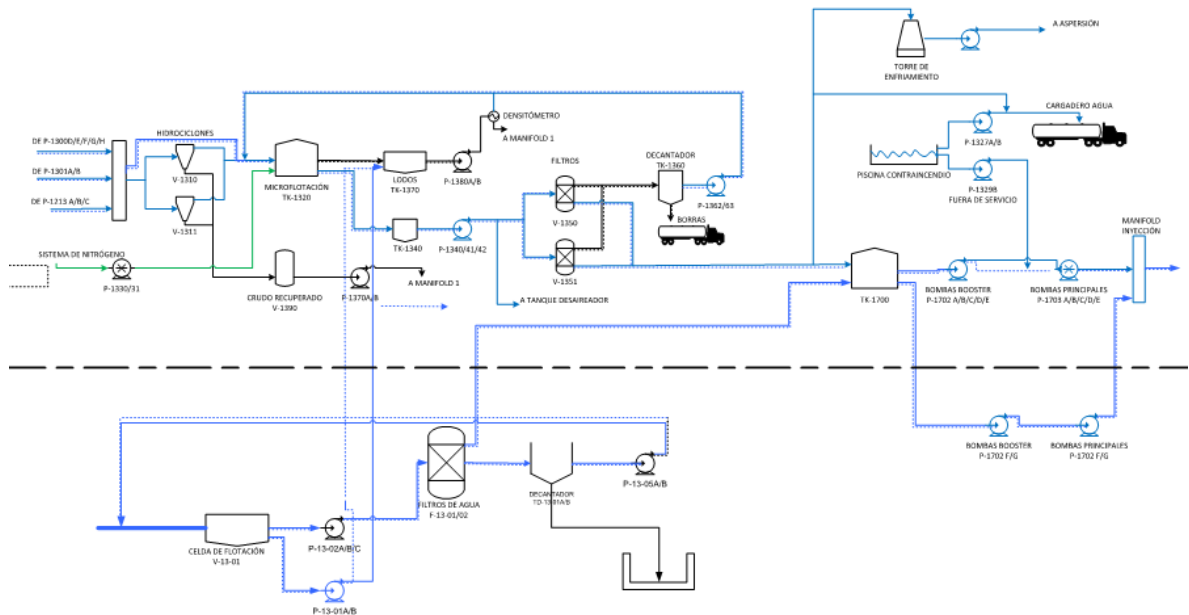
Posteriormente en 2013 y 2014 se introdujeron en cada estación plantas de tratamiento de agua, eliminando las piscinas y mejorando bastante la calidad del agua de inyección reduciendo las ppm de aceite y sólidos suspendidos y disminuyendo la cantidad de oxígeno que entra al sistema a valores de partes de billón (ppb), sin embargo, aún el proceso es abierto y sigue entrando oxígeno al sistema por los tanques de inyección aunque en mucha menos cantidad. A la fecha no se tiene implementado ningún tipo de inyección de química efectiva a la salida de la planta de tratamiento. Los pozos de inyección más antiguos son del 2009 seguidos de pozos que iniciaron operación en 2012, 2013 y 2015.

En la **Figura 1** se observa a manera de ejemplo el sistema de tratamiento de agua para inyección de la estación Jaguar, en las demás estaciones existen plantas similares. En Jaguar existen dos plantas una denominada “Exterran” por su fabricante, que se observa en la parte inferior de la figura e interconectada con otra planta denominada “Bawer” en la parte superior; la de “Exterran” utiliza una celda de flotación como etapa primaria del proceso para luego pasar a los filtros de cáscara de nuez y pasar al tanque de inyección que da la cabeza necesaria para luego pasar a las bombas “Booster” y bombas principales para finalmente pasar a un manifold de inyección ya presurizada a presión de inyección en donde inician las líneas de flujo (no se muestran en el esquema) y luego a los pozos de inyección.

La planta “Bawer” utiliza como etapa primaria del proceso hidrociclones para luego pasar a un tanque de microflotación y continua un proceso similar al de “Exterran” con filtros de cáscara de nuez y se alimenta al mismo tanque de inyección para llegar a bombas “Booster” y bombas principales hasta entregar el sistema a la

presión de inyección en el manifold, luego a líneas de inyección y a los pozos de inyección.

Figura 1. Diagrama de Flujo de Proceso de la Planta de Agua en la estación Jaguar a marzo de 2018, el sistema de Nitrógeno no está instalado.



Fuente: El Autor

Se implementó un programa de monitoreo de corrosividad en donde se realizan fisicoquímicos al agua de inyección observando que el agua de los 3 campos es muy similar y es un agua relativamente noble con pH con tendencia neutra, el índice de Langelier no favorece la formación de CaCO_3 ni tampoco existe una fuerte tendencia corrosiva sino que está en equilibrio, los contenidos de CO_2 disueltos son muy bajos, no se evidencia H_2S y los valores de los metales presentes son muy bajos.

Tabla 1. Resultados de análisis fisicoquímicos del agua de inyección en cabeza de pozo de agosto de 2017 en 3 pozos uno por cada campo.

RESULTADOS ANÁLISIS FISICOQUÍMICOS															
PARÁMETRO		pH	Temperatura °C	H ₂ S dos mg/ L	CO ₂ dis mg/L	O ₂ dis mg/L	Conduc-tividad µs/cm	Alcalinidad mg/L	Sulfatos mg/L	Cloruros mg/L	TDS mg/L	ST mg/L	SST mg/L	Turbidez FAU	Dureza total mg/L
MUESTRA	ID														
ID INTERNA	EXTERNA														
EF 0100-17 M001	JGR 12	7,5	64	0,1	4,50	0,070	830,00	380,0	31,00	79,2	551,4	651,42	46,51	300	80,00
EF 0100-17 M002	CCS A12	8,1	68	0,0	7,00	0,022	1130,00	496,0	<1,00	46,40	1048,57	1092,8	9,50	66	23,90
EF 0100-17 M003	TSN 002	7,5	58	0,0	4,50	0,049	510,00	212,0	1,00	34,80	327,14	370,00	1,50	18	20,00

Fuente: INSTITUTO PARA LA INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE LOS MATERIALES. Monitoreo de corrosión mediante análisis fisicoquímico. INCITEMA. Tunja, 2017. P. 14.

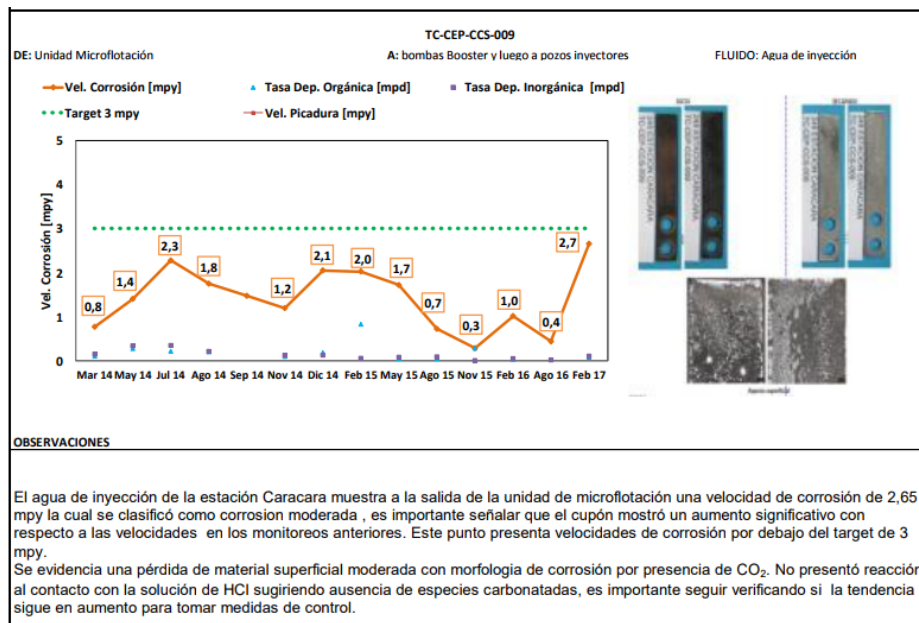
Tabla 2. Resultados de análisis fisicoquímicos del agua de inyección en cabeza de pozo de agosto de 2017 en 3 pozos uno por cada campo.

RESULTADOS ANÁLISIS FISICOQUÍMICOS - METALES									
PARÁMETRO		Ca mg/L	Fe mg/L	Si mg/L	Mg mg/L	Mn mg/L	Na mg/L	Sr mg/L	Ba mg/L
MUESTRA	ID EXTERNA								
EF 0100-17 M001	JGR 12	3,24	0,69	0,35	1,03	<0,1	140,65	<0,3	2,00
EF 0100-17 M002	CCS A12	6,13	0,94	0,69	1,47	<0,1	238,72	<0,3	3,66
EF 0100-17 M003	TSN 002	0,94	1,02	1,53	0,33	<0,1	82,23	<0,3	2,70

Fuente: INSTITUTO PARA LA INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE LOS MATERIALES. Monitoreo de corrosión mediante análisis fisicoquímico. INCITEMA. Tunja, 2017. P. 15.

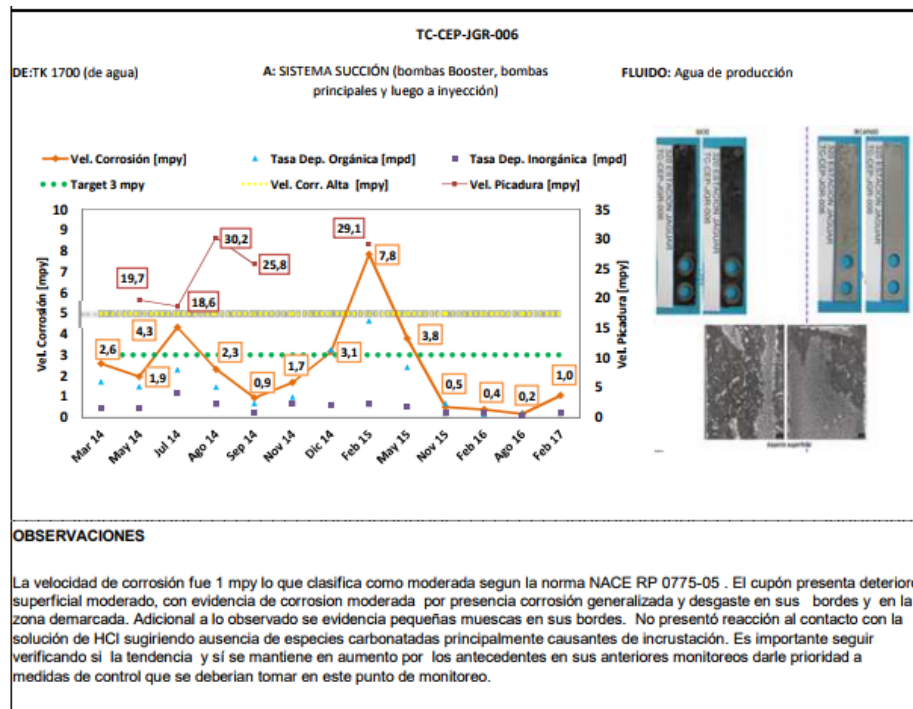
Las velocidades de corrosión que se han monitoreado por pérdida de peso en las tres estaciones en el sistema de agua de inyección se han limitado a las succiones de las bombas “Booster” en sistemas de baja presión y los resultados de las velocidades obtenidas se muestran en la **Figura 2**, **Figura 3** y **Figura 4** (última lectura realizada en febrero de 2017):

Figura 2. Velocidad de corrosión en la succión de bombas booster del agua de inyección de Caracara Sur.



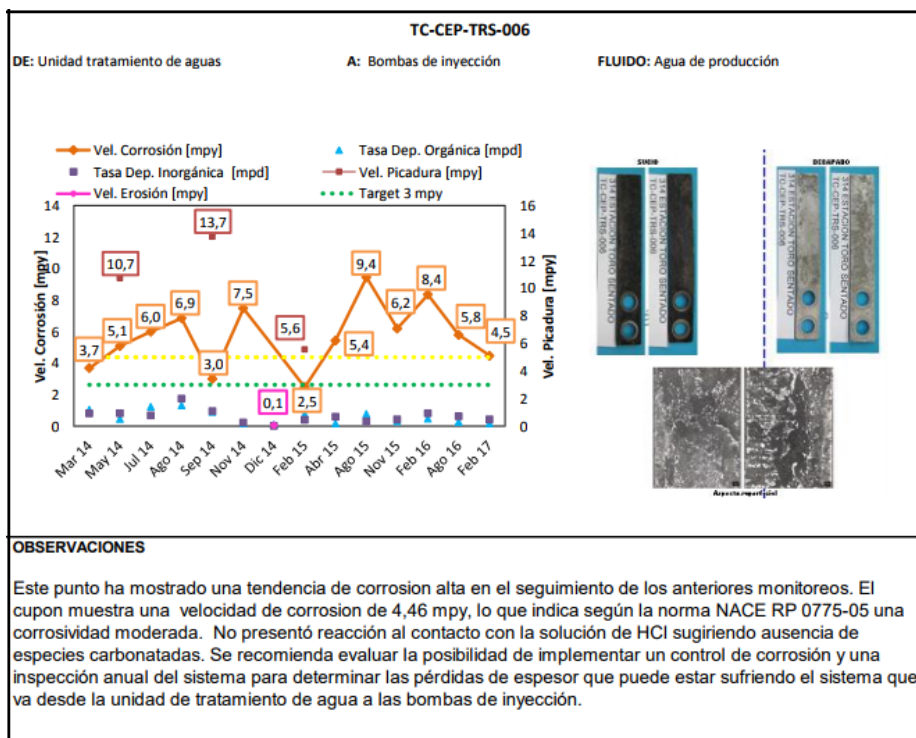
Fuente: CEPSA. Informe de Monitoreo Gravimétrico en Estaciones y Pozos de los Sectores de Caracara Sur, Jaguar y Torosentado. Tecnicontrol, 2017. TC-0301-IN-I-CEP-34, p. 6

Figura 3. Velocidad de corrosión en la succión de bombas booster del agua de inyección de Jaguar.



Fuente: CEPSA. Informe de Monitoreo Gravimétrico en Estaciones y Pozos de los Sectores de Caracara Sur, Jaguar y Torosentado. Tecnicontrol, 2017. TC-0301-IN-I-CEP-34, p. 15

Figura 4. Velocidad de corrosión en la succión de bombas booster del agua de inyección de Torosentado.



Fuente: CEPSA. Informe de Monitoreo Gravimétrico en Estaciones y Pozos de los Sectores de Caracara Sur, Jaguar y Torosentado. Tecnicontrol, 2017. TC-0301-IN-I-CEP-34, p. 14

No se tiene implementada a la fecha el monitoreo de cupones en sistema de alta presión como la línea y el pozo de inyección, por esta razón se procedió con ayuda del INCITEMA a realizar en agosto de 2017 en cabeza de pozo la caracterización del agua que finalmente es inyectada y a determinar por LPR la velocidad de corrosión. Los resultados se muestran a continuación:

Tabla 3. Velocidades de corrosión de las aguas de inyección en cabeza de pozo de agosto de 2017 en 3 pozos uno por cada campo por LPR.

MUESTRA		VELOCIDAD DE CORROSIÓN MPY	Nivel de Corrosión
ID INTERNA	ID EXTERNA		
EF 0100-16 M001	JGR 12	6,70	Alto
EF 0100-16 M002	CCS A12	7,98	Alto
EF 0100-16 M003	TSN 002	5,72	Alto

Fuente: INSTITUTO PARA LA INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE LOS MATERIALES. Monitoreo de corrosión mediante análisis fisicoquímico. INCITEMA. Tunja, 2017. P. 20.

Las velocidades de corrosión encontradas son altas pese a que la carga iónica de las aguas es baja y no tiene tendencia corrosiva fuerte y estas velocidades son mayores a las registradas por pérdida de peso en la succión de bombas “Booster”

de cada estación y son influenciadas principalmente por la concentración de oxígeno de 22 a 70 ppb de acuerdo a los resultados de las muestras analizadas y posiblemente otras variables como la temperatura y la velocidad de flujo.

Dados los resultados anteriores y el problema principal del oxígeno en el sistema se requiere implementar un programa de control de corrosión que constará de un sistema de gas blanketing para disminuir la entrada de oxígeno operando así con un circuito cerrado, el monitoreo por cupones (en las línea de alta presión y pozos de inyección) y la inyección de inhibidores de corrosión si se comprueba es efectiva.

El alcance del presente trabajo de investigación solo estará limitado a la evaluación de los inhibidores de corrosión.

1.2 JUSTIFICACIÓN

El sistema de inyección de agua del campo es el sistema fundamental que controla los barriles de crudo producidos diariamente, en otras palabras una salida del sistema de inyección por una falla del sistema eléctrico o una falla en una línea de inyección o en un pozo o por una simple pérdida de control en una válvula que no permita aislar el sistema, limita de inmediato la capacidad de inyección, teniendo que cerrar el proceso aguas arriba para no seguir generando más agua; por esta razón existe una lógica ya establecida de apagado de pozos “aguateros” cuando ocurre una contingencia que en casos extremos puede llegar a parar la estación, pese a tener varias bombas de inyección disponibles, solo se tiene acceso a los pozos de inyección a través de un solo manifold lo que limita las maniobras en una falla. En el campo solo en caso de una contingencia está permitido realizar aspersión.

Dado lo anterior es muy importante poder asegurar que tanto en las líneas de inyección de agua como en los pozos de inyección de agua se tengan identificadas y controladas todas las posibles amenazas a la integridad (corrosión interna, corrosión externa, daños por terceros, daños en equipos, etc) que puedan llevar a la falla inesperada del sistema, por las pérdidas económicas que genera.

Algunas de las líneas de inyección del campo más antiguas fueron construidas con tubing roscadas (tuberías usadas para producción de pozos), están sin recubrimiento y además son aéreas lo que aumenta el riesgo al personal en caso de una falla, sin embargo, están siendo reemplazadas por tuberías soldadas, revestidas y enterradas. Este factor sumado a que se operó muchos años con sistemas completamente abiertos que pudieron favorecer procesos corrosivos por bacterias y por oxígeno que hacen que aumente la incertidumbre por el daño que puedan tener los pozos.

También se viene implementando un plan de inspección y monitoreo de los recubrimientos de las líneas de inyección observando que, pese a llevar poco tiempo de exposición a las condiciones operativas y del suelo, están en pésimo estado, con presencia de corrosión externa en las tuberías incluso activa con velocidades de corrosión incluso de 50 milipulgadas por año (mpy por sus siglas en inglés). Estas condiciones llevaron a implementar un sistema de protección catódica para empezar a mitigar este problema, mientras se van reparando los puntos más críticos. Si sumamos este problema de altas velocidades de corrosión externas, más las velocidades de corrosión internas, se tienen que buscar los mecanismos más adecuados para controlar estos fenómenos y mantener las velocidades de corrosión por debajo de 3 mpy que es el límite seguro permitido por la empresa.

En el **Anexo A** se detallan los esquemas de completamiento de los pozos de inyección objeto del estudio para los pozos CCSA-12, JGR-12 y TRS-N2, los materiales son similares en su mayoría tienen tuberías grado API N80 y en algunos casos tuberías grado API P110.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo general. Evaluar el uso de tres técnicas electroquímicas diferentes (LPR, Tafel y EIS – Espectroscopia de Impedancia Electroquímica) para determinar la eficiencia de inhibidores de corrosión evaluados en condiciones similares a las presentes en un pozo de inyección.

1.3.2 Objetivos específicos. Se establecieron los siguientes 4 objetivos específicos:

- Evaluar la eficiencia de tres (3) inhibidores de corrosión utilizados en la industria, determinando la resistencia a la polarización, velocidad de corrosión e impedancia electroquímica.
- Determinar la influencia de la temperatura, concentración de O₂ y dosificación de inhibidor de corrosión en la ocurrencia y severidad de fenómenos corrosivos, a través de control paramétrico.
- Hacer un análisis morfológico mediante microscopia.
- Establecer la dosificación más efectiva para disminuir mecanismos de corrosión a las condiciones evaluadas, basadas en un análisis paramétrico de las diferentes técnicas usadas.

2. MARCO TEORICO

A continuación se realizará una descripción de las técnicas electroquímicas que se utilizarán en la investigación para la medición de la corrosión, las mismas han experimentado una creciente popularidad entre los ingenieros de corrosión, debido principalmente a la rapidez con la que pueden realizarse estas mediciones. Los estudios de corrosión a largo plazo, como las determinaciones de pérdida de peso por lectura de cupones, pueden tardar días o semanas en completarse, mientras que un experimento electroquímico requerirá, como máximo, varias horas. La velocidad de las mediciones electroquímicas es especialmente útil para aquellos metales o aleaciones que son altamente resistentes a la corrosión¹.

2.1 RESISTENCIA A LA POLARIZACIÓN LINEAL

Esta técnica electroquímica de resistencia a la polarización se usa para medir las velocidades de corrosión absolutas, usualmente expresadas en mpy.

Las mediciones de resistencia a la polarización pueden hacerse muy rápidamente, usualmente en menos de diez minutos. A menudo se puede establecer una excelente correlación entre las velocidades de corrosión obtenidas por resistencia a la polarización lineal y las obtenidas por pérdida de peso mediante la lectura de cupones².

En realidad no se mide directamente la velocidad de corrosión sino que se mide la resistencia a la polarización (R_p) y luego por una expresión matemática se determina la velocidad de corrosión. La resistencia a la polarización se define como la resistencia de la muestra a la oxidación durante la aplicación de un potencial externo.

En un experimento de Resistencia a la Polarización, se obtienen los datos escaneando un rango de ± 20 mV sobre E_{CORR} (el potencial de circuito abierto). Un escaneo típico comienza a -20 mV vs el E_{CORR} y termina a +20 mV vs el E_{CORR} . La velocidad de escaneo es típicamente 0,1 mV/seg. La curva traza el potencial aplicado vs la corriente medida³.

Analizaremos a continuación la teoría básica de R_p que muestra cómo se hace: R_p se determina por el cálculo de la pendiente de la región lineal de la gráfica (ver

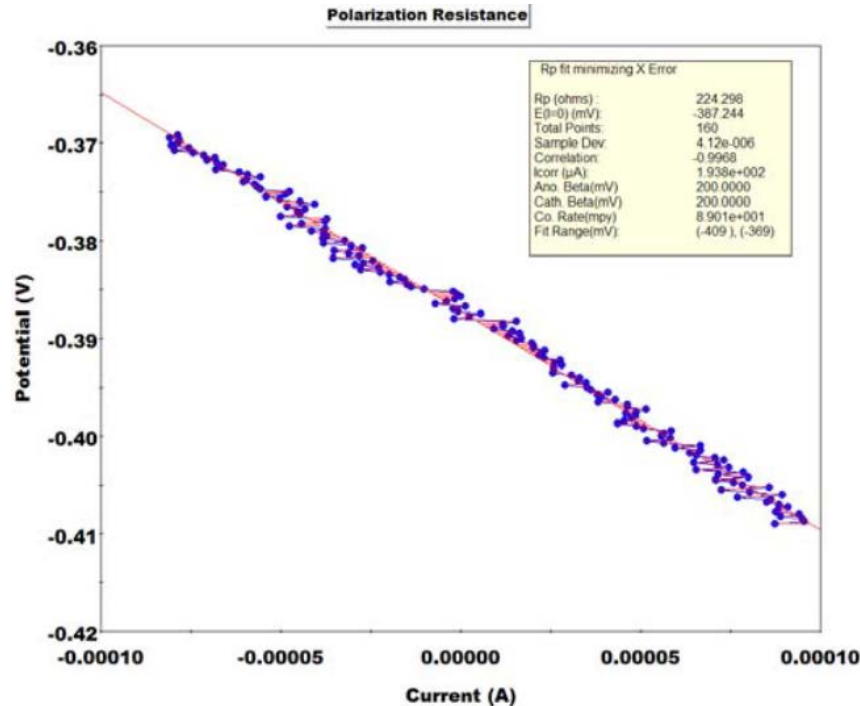
¹ Princeton Applied Research. Basics of Corrosion Measurements. En: Princeton Applied Research. Application Note CORR-1. 1980, p. 6.

² Princeton Applied Research. Electrochemistry and Corrosion: Overview and Techniques. En: Princeton Applied Research. Application Note CORR-4. 2000, p. 8.

³ Ibid., p. 8.

Figura 5) y sus unidades son de resistencia, de aquí el nombre de resistencia a la polarización.

Figura 5. Un gráfico típico de Resistencia a la Polarización Lineal.



Fuente: Princeton Applied Research. Basics of Corrosion Measurements. En: Princeton Applied Research. Application Note CORR-1. 1980, p.8.

Para calcular la velocidad de corrosión se debe primero determinar la corriente de corrosión (i_{CORR}). Para determinar la corriente de corrosión a partir del gráfico de Resistencia a la Polarización, se necesitan las constantes de Tafel (las pendientes anódicas y catódicas de las regiones lineales de la curva). Se pueden medir estas constantes de Tafel a partir de una corrida de Tafel previa o se puede usar un valor conocido o estimado. La fórmula a continuación muestra la relación entre el valor R_p , las constantes de Tafel y la corriente de corrosión:

$$\frac{\Delta E}{\Delta i} = R_p = \frac{\beta_A \beta_C}{2.3 (i_{\text{CORR}}) (\beta_A + \beta_C)} \quad (\text{Ecuación 1})$$

$$\frac{\Delta E}{\Delta i} = R_p = \text{la pendiente de la región lineal}$$

ΔE se expresa en voltios (V)

Δi se expresa el microamperios (μA).

β_A = Constante anódica de Tafel expresada en voltios por década de corriente

β_C = Constante catódica de Tafel expresada en voltios por década de corriente

2.3 = es el logaritmo natural en base 10

i_{CORR} = corriente de corrosión (μA)

A partir de la ecuación (1) se deriva la ecuación necesaria para calcular la corriente de corrosión:

$$I_{\text{corr}} = \frac{\beta_A \beta_C}{2.3 (R_p) (\beta_A + \beta_C)} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Una vez i_{CORR} se determina, la velocidad de corrosión en mpy se puede calcular a partir de la siguiente ecuación:

$$\text{Velocidad de Corrosión (mpy)} = \frac{0.13 i_{\text{corr}} (E.W)}{A d} \quad (\text{Ecuación 3})$$

EW = Peso equivalente (en g/eq)

A = área (en cm^2)

d = densidad (en g/cm^3)

0.13 = factor de conversión métrica y tiempo

Además de proporcionar información cuantitativa como la corriente de corrosión y la velocidad de corrosión, el valor R_p puede ayudar a evaluar la habilidad relativa de un material para resistir la corrosión. Dado que la Resistencia a la Polarización es inversamente proporcional a la corriente de corrosión, es fácil clasificar una serie de materiales de acuerdo con sus valores de R_p . Asumiendo que todas las muestras son de igual área superficial, los materiales con la mayor R_p (y por lo tanto la menor corriente de corrosión) tienen la mayor resistencia a la corrosión (con respecto a los otros materiales).

Existen dos ventajas de un gráfico de Resistencia a la Polarización sobre un diagrama de Tafel: primero la medición de la R_p toma un tiempo mucho más corto para tomarse; y segundo, la técnica de R_p expone la muestra a pequeños voltajes y así no hace cambios significativos en la superficie de la muestra⁴.

2.2 DIAGRAMA DE TAFEL

Esta técnica se utiliza para medir la corriente de corrosión (i_{CORR}) de manera que se puede calcular la velocidad de corrosión. Un diagrama de Tafel puede producir la i_{CORR} directamente o puede producir las constantes de Tafel, β_A y β_C . Las constantes Tafel pueden usarse con el valor R_p para calcular i_{CORR} . (ver Resistencia a la Polarización)⁵.

Se puede generar un diagrama de Tafel iniciando su escaneo en E_{CORR} y escaneando a -250 mV vs. E_{CORR} (para un diagrama de Tafel catódico) (Ver **Figura 6**) o +250 mV vs. E_{CORR} (para un diagrama de Tafel anódico). Es posible obtener ambos diagramas de Tafel en una sola exploración iniciando el escaneo en -250 mV vs el E_{CORR} y escaneando continuamente hasta +250 mV

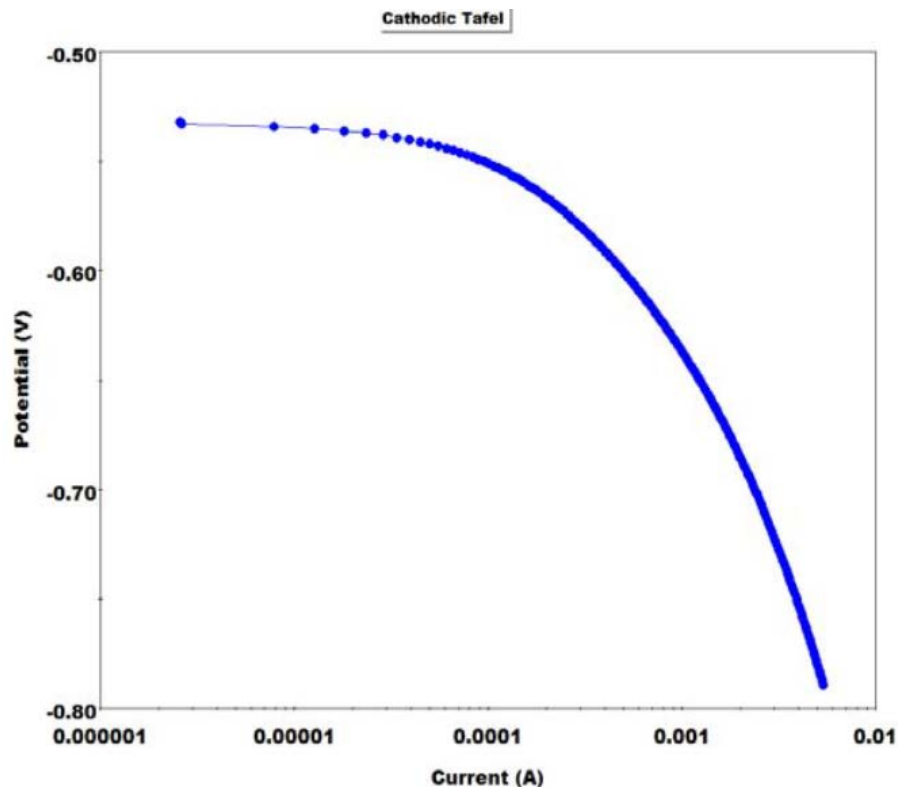
⁴ Ibid., p. 9.

⁵ Ibid., p. 7.

vs el E_{CORR} . Al hacer esto, existe el peligro de que la parte negativa de la exploración altere la superficie de la muestra y, por tanto, cambie sus características durante la parte positiva de la exploración.

La velocidad de escaneo es típicamente 0,1 mV / seg. La curva resultante es un gráfico del potencial aplicado vs el logaritmo de la corriente medida.

Figura 6. Un diagrama de Tafel típico catódico



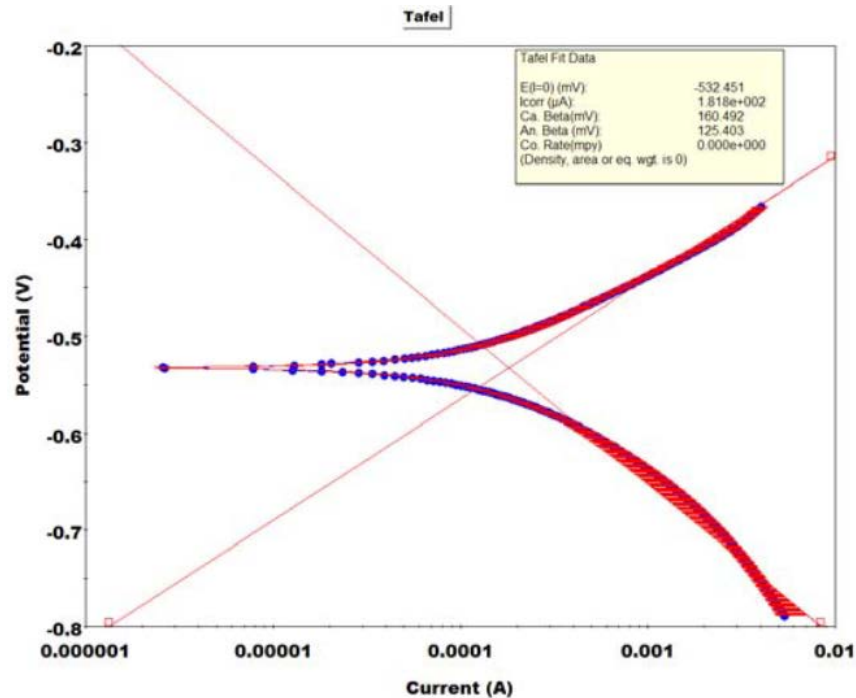
Fuente: Princeton Applied Research. Basics of Corrosion Measurements. En: Princeton Applied Research. Application Note CORR-1. 1980, p.7.

Una forma de determinar la i_{CORR} es superponer una línea recta a lo largo de la porción lineal de la curva anódica o catódica y extrapolarla a través del E_{CORR} . Bajo condiciones ideales, el diagrama de Tafel será lineal en un rango de potenciales. Para un diagrama de Tafel catódico, esto ocurre entre -50 mV y -250 mV vs el E_{CORR} . Para un diagrama de Tafel anódico, esto ocurre entre +50 mV y +250 mV vs el E_{CORR} . Si una línea recta de "mejor ajuste" es extrapolada a través del E_{CORR} , el punto de intersección en E_{CORR} da el valor i_{CORR} .

Para un solo diagrama que comprenda tanto las regiones anódicas como catódicas de Tafel, las dos extrapolaciones de línea recta deben intersectarse en el E_{CORR} (ver **Figura 7**). Si no observa esto, entonces la reacción anódica o catódica no es consistente con el modelo simple en el que se basa la técnica. Otros, mecanismos más complejos es probable que afecten una de las

reacciones. En este caso, puede utilizar el gráfico Tafel más lineal para determinar i_{CORR} .

Figura 7. Diagrama de Tafel combinado anódico y catódico



Fuente: Princeton Applied Research. Basics of Corrosion Measurements. En: Princeton Applied Research. Application Note CORR-1. 1980, p.7.

La pendiente de la línea recta ajustada a los datos de Tafel se denomina constante de Tafel (β). Se determina una constante de Tafel anódica (β_A) a partir de un ajuste de la región lineal anódica y una constante catódica de Tafel (β_C) a partir de un ajuste de la región lineal catódica.

Una vez que se ha determinado la i_{CORR} , se puede usar una ecuación para calcular la velocidad de corrosión. (...ver la ecuación (3) anterior en la sección de Resistencia a la Polarización...).

Se obtiene la más precisa medición de la i_{CORR} cuando se cumple las tres condiciones siguientes:

1. Hacer mediciones separadas para determinar los valores de β_A , β_C y R_P . (Véase Resistencia a la polarización)
2. Utilice una muestra nueva y una solución fresca para cada medición.
3. Utilice las ecuaciones del experimento de Resistencia a la Polarización⁶.

⁶ Ibid., p. 7-8.

2.3 ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUÍMICA

2.3.1 Introducción. La técnica de Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIS, por sus siglas en inglés), es un método electroquímico utilizado en estudios de corrosión, el cual se basa en el uso de una señal de corriente alterna (CA) que es aplicada a un electrodo (metal en corrosión) y determinando la respuesta correspondiente.

En el procedimiento experimental más comúnmente usado, se aplica una pequeña señal de potencial (E) a un electrodo y se mide su respuesta en corriente (I) a diferentes frecuencias. No obstante, en ciertas circunstancias, es posible aplicar una señal pequeña de corriente y medir la respuesta en potencial del sistema. Así, el equipo electrónico usado procesa las mediciones de potencial - tiempo y corriente - tiempo, dando como resultado una serie de valores de impedancia correspondientes a cada frecuencia estudiada. Esta relación de valores de impedancia y frecuencia se denomina “espectro de impedancias”.

En el caso de los estudios de corrosión que utilizan la técnica de EIS, los espectros de impedancia obtenidos suelen ser analizados mediante circuitos eléctricos, compuestos por componentes tales como resistencias (R), capacitancias (C), inductancias (L), etc. Combinados de tal manera que reproduzcan los espectros de impedancia medidos. Estos circuitos eléctricos son denominados “circuitos eléctricos equivalentes”⁷.

2.3.2 Que es la Impedancia? Los términos resistencia e impedancia indican una oposición al flujo de electrones o corriente. En circuitos de corriente continua DC, sólo las resistencias producen este efecto. Sin embargo, en circuitos de corriente alterna (AC), otros dos elementos del circuito, capacitores e inductores, impiden el flujo de electrones. La impedancia puede expresarse como un número complejo, donde la resistencia es el componente real y la capacitancia e inductancia combinadas es el componente imaginario.

La impedancia total en un circuito es la oposición combinada de todas sus resistencias, capacitores e inductores al flujo de electrones. La oposición de capacitores e inductores recibe el mismo nombre de reactancia, simbolizada por X y medida en ohmios (Ω). Dado que el símbolo para la capacitancia es C, la reactancia capacitiva es simbolizada por XC. Del mismo modo, dado que el símbolo de inductancia es L, la reactividad inductiva se simboliza por XL.

Los capacitores e inductores afectan no sólo la magnitud de una corriente alterna sino también sus características dependientes del tiempo o fase. Cuando la mayor parte de la oposición al flujo de corriente viene de su reactancia capacitiva, se dice que un circuito es en gran medida capacitivo y la corriente conduce el voltaje aplicado en el ángulo de fase. Cuando la mayor parte de la oposición al flujo de corriente proviene de su reactividad inductiva,

⁷ MENDOZA FLORES, Juan; DURAN ROMERO, Rubén y GENESCA LLOQUERAS, Joan. Espectroscopia de Impedancia Electroquímica en Corrosión, Notas de Clase. Instituto Mexicano del Petróleo, Facultad de Química UNAM. 2012, p. 3.

se dice que un circuito es en gran parte inductivo y la corriente está retrasada en el voltaje aplicado en el ángulo de fase. Cuanto más inductivo es un circuito, más cerca se aproxima la diferencia en ángulo de fase de 90 grados.

A veces es más fácil realizar cálculos usando la admitancia, el recíproco de la impedancia. La admitancia se simboliza por Y y se mide en siemens (S). Al igual que la impedancia, la admitancia se expresa como un número complejo, donde la conductancia, el recíproco de resistencia, es el componente real, y la susceptibilidad, el recíproco de reactancia, es la componente imaginaria⁸.

2.3.3 Reseña. La teoría de la impedancia electroquímica es una rama bien desarrollada de la teoría de la corriente alterna que describe la respuesta de un circuito a una corriente o tensión alterna en función de la frecuencia. La matemática de la teoría está más allá del alcance de esta discusión, pero aquí presentamos la teoría básica.

En la teoría de la corriente continua DC (un caso especial de la teoría de la CA donde la frecuencia es igual a 0 Hz) la resistencia se define por la ley de Ohm:

$$E = I R \quad (1)$$

Usando la ley de Ohm, se puede aplicar un potencial de corriente continua (E) a un circuito, medir la corriente resultante (I) y calcular la resistencia (R) - o determinar cualquier término de la ecuación si los otros dos son conocidos. Los valores potenciales se miden en voltios (V), la corriente en amperios (A), y la resistencia en ohmios (Ω). Una resistencia es el único elemento que impide el flujo de electrones en un circuito de DC.

En la teoría de corriente alterna AC, donde la frecuencia no es cero, la ecuación análoga es:

$$E = I Z \quad (2)$$

Como en la ecuación 1, E e I se definen aquí como *potencial* y *corriente*, respectivamente. Z se define como *impedancia*, el equivalente AC de la resistencia. Los valores de impedancia también se miden en ohmios (Ω). Además de las resistencias, los capacitores y los inductores impiden el flujo de electrones en circuitos de corriente alterna. Es necesario hacer notar que a diferencia de la resistencia, la impedancia de un circuito de CA depende de la frecuencia de la señal que sea aplicada. La frecuencia (f) de un sistema de CA se expresa en unidades de hertz (Hz) o número de ciclos por segundo (s^{-1})

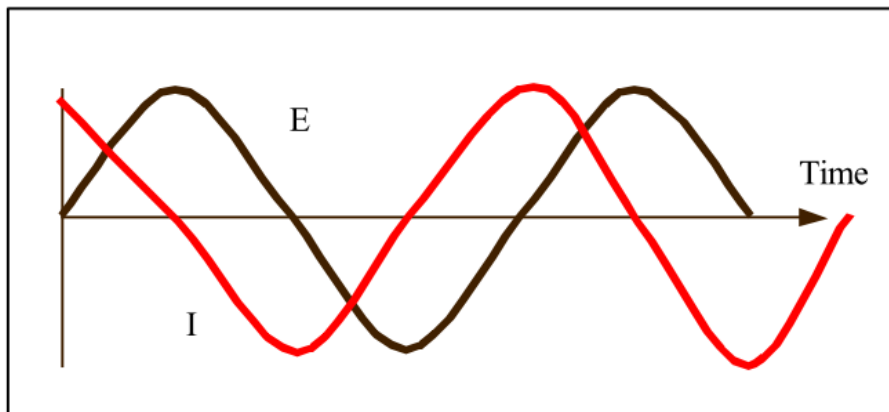
En una celda electroquímica, la cinética de los electrodos lentos, las reacciones químicas previas lentas y la difusión pueden impedir el flujo de electrones, y

⁸ Princeton Applied Research. Application Note AC-1. Basics of Electrochemical Impedance Spectroscopy. En: Princeton Applied Research. Application Note CORR-1. 1987, p. 2.

pueden considerarse análogas a las resistencias, capacitores e inductores que impiden el flujo de electrones en un circuito de corriente alterna.

La **Figura 8** muestra un diagrama típico de una onda de voltaje sinusoidal (E) que es aplicada a través de un circuito dado y la forma de onda de corriente alterna resultante (I). Se observa que las dos trazas son diferentes no sólo en amplitud, sino que también se desplazan en el tiempo.

Figura 8. Formas de ondas AC para un potencial aplicado y una corriente resultante



Fuente: Princeton Applied Research. Application Note AC-1. Basics of Electrochemical Impedance Spectroscopy. En: Princeton Applied Research. Application Note CORR-1. 1987, p. 2

Cada una con respecto a la otra está fuera de fase. En el caso de una red puramente resistiva, las dos formas de onda no serían desplazadas. Estarían exactamente en fase, difiriendo sólo en amplitud.

La corriente de onda sinusoidal se puede describir por la ecuación:

$$I(t) = A \sin (wt + \theta) \quad (3) \text{ donde}$$

$I(t)$ = Corriente instantánea

A = amplitud máxima

w = frecuencia en radianes por segundo = $2\pi f$ (donde f es la frecuencia en Hertz)

t = tiempo

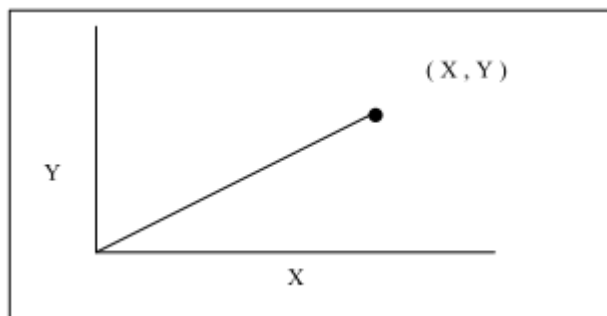
θ = cambio de fase en radianes⁹

2.3.3.1 Análisis Vectorial. En la comprensión de la teoría que soporta la técnica de EIS, es conveniente describir a la corriente y al voltaje como vectores giratorios.

El análisis vectorial proporciona un método conveniente para caracterizar una forma de onda AC. Permite describir la onda en términos de sus características de amplitud y fase.

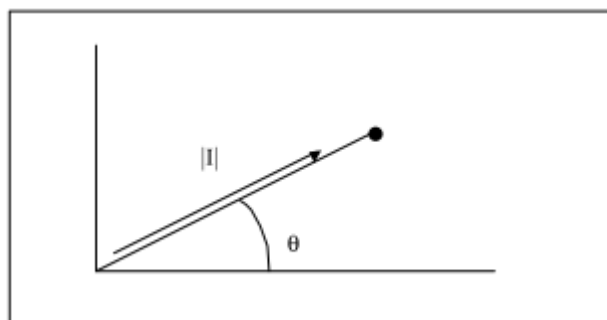
⁹ Ibid., p. 2.

Figura 9. Vector en términos de coordenadas X y Y



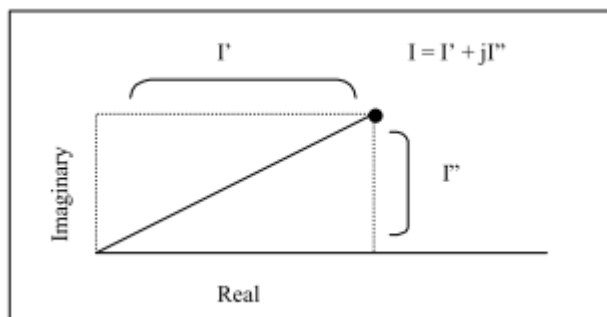
Fuente: Princeton Applied Research. Application Note AC-1. Basics of Electrochemical Impedance Spectroscopy. **En:** Princeton Applied Research. Application Note CORR-1. 1987, p. 2

Figura 10. Vector en términos de ángulo (θ) and Magnitud ($|Z|$)



Fuente: Princeton Applied Research. Application Note AC-1. Basics of Electrochemical Impedance Spectroscopy. **En:** Princeton Applied Research. Application Note CORR-1. 1987, p. 2

Figura 11. Vector en términos de coordenadas Real I' e Imaginaria I''



Fuente: Princeton Applied Research. Application Note AC-1. Basics of Electrochemical Impedance Spectroscopy. **En:** Princeton Applied Research. Application Note CORR-1. 1987, p. 2

Por ejemplo, la **Figura 9**, **Figura 10** y **Figura 11** muestran análisis vectoriales para la forma de onda de corriente resultante de la **Figura 8**. El vector de forma de onda de corriente puede describirse gráficamente de una variedad de maneras.

La **Figura 9** muestra cómo se puede describir el punto final del vector en términos de un par de coordenadas (x, y) formado a partir de los componentes en fase (x) y fuera de fase (y). En la **Figura 10**, el vector se define sin ambigüedad por el ángulo de fase (θ) y la magnitud de la corriente ($|I|$).

La **Figura 11** muestra un tercer enfoque, a menudo más conveniente para el análisis numérico. Los ejes se definen como reales (I') e imaginarios (I''). Los componentes real e imaginario se pueden manejar como un solo número en ecuaciones complicadas si se utiliza la notación de número complejo. La convención matemática para expresar las cantidades en este sistema de coordenadas es multiplicar el valor de coordenada I'' , o imaginario, por $\sqrt{-1}$.

Utilizando la convención del número complejo, un vector de corriente AC se puede definir como la suma de sus componentes real e imaginario:

$$I_{\text{Total}} = I' + I'' j \quad (4) \text{ donde}$$

$$j = \sqrt{-1}$$

Aunque los matemáticos usan i para expresar $\sqrt{-1}$, los electroquímicos utilizan j , para evitar la confusión con i , el símbolo de corriente.

La ubicación del punto en la **Figura 9**, **Figura 10** y **Figura 11** no ha cambiado - sólo las etiquetas en los ejes son diferentes. Las tres maneras diferentes de expresar la posición del punto - (x, y) par, el ángulo de fase / magnitud, y las coordenadas reales / imaginarias son realmente todas iguales.

Los componentes real e imaginario de una corriente alterna o de una onda de voltaje definen con respecto a alguna forma de onda de referencia. El componente real está en fase con la forma de onda de referencia, y el componente imaginario (o componente en cuadratura) es exactamente 90 grados fuera de fase. La forma de onda de referencia permite expresar las formas de onda de corriente y voltaje como vectores con respecto a los mismos ejes de coordenadas. Esto facilita la manipulación matemática de estas cantidades vectoriales.

Específicamente, esto nos permite usar la Ecuación 2 para calcular el vector de impedancia como el cociente de los vectores de voltaje y corriente:

$$Z_{\text{TOTAL}} = \frac{E' + E'' j}{I' + I'' j} \quad (5)$$

Donde el vector voltaje AC, E , también se puede expresar como un número complejo.

$$E_{\text{TOTAL}} = E' + E'' j \quad (6)$$

La expresión vectorial resultante para la impedancia AC,

$$Z_{\text{TOTAL}} = Z' + Z''j \quad (7)$$

Se define en términos de los mismos ejes de coordenadas como los vectores corriente y voltaje.

Por analogía con la **Figura 10** y **Figura 11**, la magnitud absoluta de la impedancia (que es la longitud del vector) se puede expresar como

$$|Z| = \sqrt{Z'^2 + Z''^2} \quad (8)$$

Y el ángulo de fase se puede definir por:

$$\tan \theta = Z'' / Z' \quad (9)^{10}$$

2.3.4 Elementos de Circuito Equivalentes. Un circuito equivalente es una combinación de elementos pasivos (resistencias, capacitancias, inductores y otras formas de impedancias distribuidas) que dan la misma respuesta, a toda frecuencia, de una celda de corrosión.

Cuando el análisis de los datos de EIS se realiza mediante un ajuste de los datos experimentales a un circuito eléctrico equivalente, se obtienen valores de diferentes parámetros eléctricos. Estos valores son utilizados para obtener información, tanto de velocidades de corrosión como de mecanismos de corrosión.

El número de circuitos equivalentes que pueden cumplir el comportamiento de una celda de corrosión es prácticamente infinito. No obstante, existe una condición esencial para la selección de un circuito equivalente: tanto los componentes del circuito, como el circuito eléctrico en sí mismo, deben tener explicación física. Esto es de particular importancia ya que usualmente pueden existir varios circuitos equivalentes que describan con la misma exactitud los datos experimentales¹¹.

Resistencia: La impedancia de una resistencia no tiene componente imaginario. El cambio de fase es cero grados - es decir, la corriente está en fase con el voltaje. Tanto la corriente como la impedancia son independientes de la frecuencia.

Capacitor: La impedancia de un capacitor no tiene componente real. Su componente imaginario es una función tanto de la capacidad como de la frecuencia. La corriente a través de un capacitor está siempre desfasada de 90 grados con el voltaje a través del mismo, con la corriente que conduce al voltaje. Debido a que la impedancia de un capacitor varía inversamente con la frecuencia, a altas frecuencias un capacitor actúa como un cortocircuito - su impedancia tiende a cero. A bajas frecuencias

¹⁰ Ibid., p. 3.

¹¹ MENDOZA FLORES. Op. Cit., p. 21

(aproximándose a DC) un condensador actúa como un circuito abierto, y la impedancia tiende hacia el infinito.

Inductor: Al igual que un capacitor, la corriente a través de un inductor está siempre fuera de fase de 90 grados con la caída de voltaje a través de ella. Sin embargo, el cambio de fase está en la dirección opuesta - la corriente se retarda detrás de voltaje. Además, a medida que aumenta la frecuencia, aumenta la impedancia de un inductor. Actúa como un cortocircuito a bajas frecuencias y como una impedancia grande a altas frecuencias.

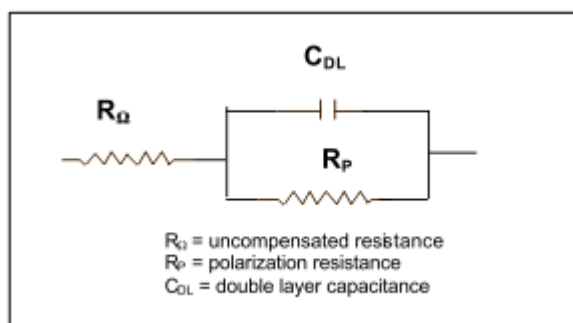
Para determinar la impedancia total de una combinación de elementos simples, se combinan los valores de impedancia de los componentes individuales de acuerdo con algunas reglas simples. Para dos elementos de circuito en serie, la impedancia combinada es simplemente la suma vectorial de los valores de impedancia individuales.

2.3.5 Análisis Gráfico. Se puede estudiar un circuito equivalente derivando su ecuación de impedancia. Sin embargo, es más sencillo realizar una medición en el circuito y analizar el gráfico resultante. Se Obtendrá una buena imagen de los componentes de impedancia real e imaginaria y de las características de cambio de fase en función de la frecuencia.

La celda de Randles (ver **Figura 12**) modela la impedancia electroquímica de una interfaz y se adapta a muchos sistemas químicos. Puede equiparar fácilmente los componentes del circuito en la celda de Randles con fenómenos físicos conocidos, como adsorción o formación de película.

R_{Ω} es la resistencia óhmica o no compensada de la solución entre los electrodos de trabajo y de referencia.

Figura 12. Circuito equivalente para una celda electroquímica simple



Fuente: Princeton Applied Research. Application Note AC-1. Basics of Electrochemical Impedance Spectroscopy. En: Princeton Applied Research. Application Note CORR-1. 1987, p. 4

R_p es la resistencia a la polarización o resistencia a la transferencia de carga en la interfaz electrodo / solución. C_{DL} es la capacitancia de doble capa en esta interfaz.

Si se conoce la polarización o la resistencia a la transferencia de carga, se puede calcular las velocidades de reacción electroquímica. Las mediciones de capacitancia de doble capa pueden proporcionar información sobre los fenómenos de adsorción y desorción. En algunos sistemas, una medición de C_{DL} puede no representar la capacitancia de doble capa. Más bien, puede indicar el grado de formación de la película o la integridad de un recubrimiento orgánico.

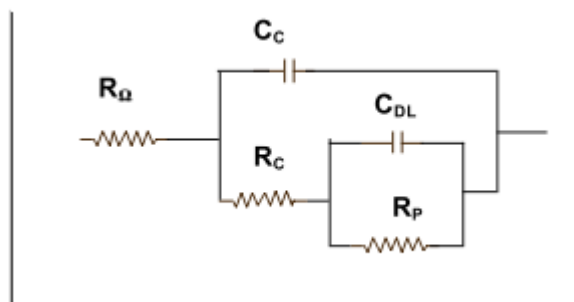
La impedancia de un capacitor disminuye a medida que la frecuencia aumenta, mientras que la impedancia de una resistencia es constante. Así, por encima de una cierta frecuencia, la impedancia del condensador, C_{DL} , es mucho menor que la impedancia de la resistencia, R_p . Dado que el C_{DL} está en paralelo con R_p , el capacitor actúa como un cortocircuito y efectivamente elimina la resistencia del circuito. A las frecuencias más altas, la impedancia del capacitor también será mucho más pequeña que R_Ω . Por lo tanto, el comportamiento de alta frecuencia de la celda Randles es controlado casi por completo por R_Ω .

Sin embargo, a las frecuencias más bajas, el condensador actúa como un circuito abierto y se elimina eficazmente del circuito. La impedancia de la celda de Randles es entonces los valores de resistencia combinados de las dos resistencias serie R_Ω y R_p .

Así, tanto en los límites de alta como de baja frecuencia, la celda de Randles se comporta principalmente como una resistencia. El componente imaginario es muy pequeño, el ángulo de fase es cercano a 0 grados y la impedancia no cambia con la frecuencia. En las frecuencias intermedias, la impedancia del condensador comienza a tener un efecto y la célula se vuelve más capacitiva. El componente imaginario se vuelve significativo, el ángulo de fase puede comenzar a acercarse a 90 grados y la impedancia de la celda se convierte en dependiente de la frecuencia.

La **Figura 13** muestra un circuito equivalente propuesto para un metal que se corroe revestido con una película porosa no conductora. Los elementos adicionales del circuito son la capacitancia del recubrimiento (C_c) y la resistencia al poro (R_{po}).

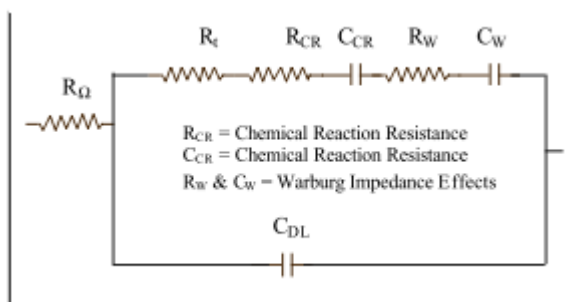
Figura 13. Circuito equivalente para un metal recubierto con una película porosa no conductora.



Fuente: Princeton Applied Research. Application Note AC-1. Basics of Electrochemical Impedance Spectroscopy. En: Princeton Applied Research. Application Note CORR-1. 1987, p. 4

El circuito de la **Figura 14** representa una reacción electroquímica acoplada a una reacción química. Aquí, R_{CR} y C_{CR} representan los efectos resistivos y capacitivos de la reacción química. El sub-circuito en caja es una ilustración simplificada de los efectos de la difusión. La resistencia incluida y el condensador, R_W y C_W , proporcionan una aproximación aproximada de la impedancia de Warburg, un valor usado para dar cuenta de las limitaciones de transferencia de masa debido a los procesos de difusión adyacentes al electrodo.

Figura 14. Circuito Equivalente para una reacción electroquímica acoplada a una reacción química



Fuente: Princeton Applied Research. Application Note AC-1. Basics of Electrochemical Impedance Spectroscopy. En: Princeton Applied Research. Application Note CORR-1. 1987, p. 4

Para determinar qué circuito equivalente describe mejor el comportamiento de un sistema electroquímico, se debe medir la impedancia en un rango de frecuencias. La técnica estándar consiste en aplicar un voltaje o corriente alterna en una amplia gama de frecuencias y medir la respuesta de corriente o voltaje del sistema electroquímico. A continuación, se puede calcular la impedancia del sistema analizando la señal de respuesta en cada frecuencia.

Para describir completamente el comportamiento de un sistema electroquímico, se debe conocer los valores de los componentes de impedancia en fase y fuera de fase en un número de frecuencias a través del rango de interés. Puede calcular estos valores aplicando la Ecuación 5 a los componentes real e imaginario de las formas de onda de excitación y respuesta. Puede caracterizar

bastante bien la mayoría de los sistemas electroquímicos reuniendo datos de impedancia en la gama de frecuencias 0,001 Hz a 1×10^4 Hz¹².

2.3.6 Diagramas de Impedancia. Una vez completado un experimento, los datos brutos en cada frecuencia medida constan de estos componentes:

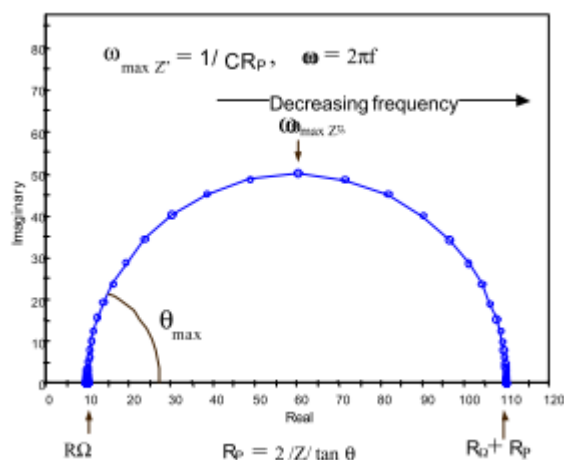
- El componente real del voltaje (E')
- El componente imaginario del voltaje (E'')
- El componente real de la corriente (I')
- El componente imaginario de la corriente (I'')

A partir de estos datos brutos se puede calcular el desplazamiento de fase (θ) y la impedancia total (Z) para cada frecuencia aplicada, así como muchas otras funciones de impedancia.

Se puede utilizar una variedad de formatos para trazar estos datos. Cada formato ofrece ventajas específicas para revelar ciertas características de un sistema químico dado. Usted puede descubrir el verdadero comportamiento de un sistema químico real sólo mirando todos los formatos de trazado disponibles¹³.

2.3.6.1 El Diagrama Nyquist. La **Figura 15** muestra un formato popular para evaluar los datos de impedancia electroquímica, el diagrama de Nyquist. Se traza el componente de impedancia imaginaria (Z'') contra la componente de impedancia real (Z') en cada frecuencia de excitación. El diagrama de la **Figura 15** ilustra la respuesta esperada del circuito simple en la **Figura 12**.

Figura 15. Diagrama de Nyquist para un Sistema Electroquímico Simple



Fuente: Princeton Applied Research. Application Note AC-1. Basics of Electrochemical Impedance Spectroscopy. En: Princeton Applied Research. Application Note CORR-1. 1987, p.6

¹² Princeton Applied Research. Application Note AC-1. Op., cit., p. 4-5

¹³ Ibid., p. 6.

Se observó que a altas frecuencias, la impedancia de la celda de Randles era casi completamente creada por la resistencia óhmica, R_Ω . La frecuencia alcanza su límite superior en el extremo izquierdo del semicírculo, donde el semicírculo toca el eje x. En el límite de baja frecuencia, la celda Randles también se aproxima a una resistencia pura, pero ahora el valor es $(\% + R_p)$. La frecuencia alcanza su límite inferior en el extremo derecho del semicírculo.

El diagrama de Nyquist tiene varias ventajas. La principal es que el formato del diagrama facilita ver los efectos de la resistencia óhmica. Si se toman datos a frecuencias suficientemente altas, es fácil extrapolar el semicírculo hacia la izquierda, hasta el eje x para leer la resistencia óhmica. La forma de la curva (a menudo un semicírculo) no cambia cuando la resistencia óhmica cambia. En consecuencia, es posible comparar los resultados de dos experimentos separados que difieren solamente en la posición del electrodo de referencia. Otra ventaja de este formato de diagrama es que enfatiza los componentes del circuito que están en serie, como R_Ω .

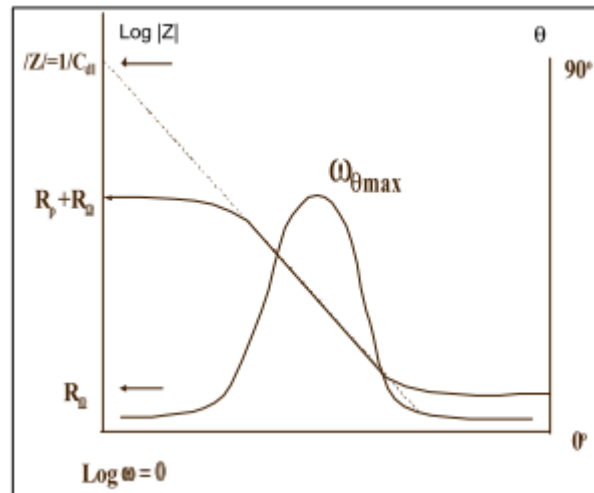
El formato del diagrama de Nyquist también tiene algunas desventajas. Por ejemplo, la frecuencia no aparece explícitamente. En segundo lugar, aunque la resistencia óhmica y la resistencia a la polarización se pueden leer fácilmente desde el gráfico de Nyquist, la capacitancia del electrodo se puede calcular solamente después de que se conozca la información de frecuencia. Como se muestra en la **Figura 15**, la frecuencia correspondiente a la parte superior del semicírculo, $\omega_{(\theta = \text{MAX})}$, se puede utilizar para calcular la capacitancia si R_p es conocido.

Aunque el formato de Nyquist enfatiza los elementos de circuitos en serie, si las redes de alta y baja impedancia están en serie, es probable que no vea el circuito de baja impedancia, ya que los controles de impedancia más grandes controlan la escala del gráfico. La **Figura 15** ilustra este punto¹⁴.

2.3.6.2 El diagrama de Bode. La **Figura 16** muestra un diagrama de Bode para los mismos datos representados en el diagrama de Nyquist en la **Figura 15**. El formato de diagrama de Bode le permite examinar la impedancia absoluta, $|Z|$, calculada por la ecuación 8 y el desplazamiento de fase θ de la impedancia, cada uno en función de la frecuencia.

¹⁴ Ibid., p. 6.

Figura 16. Diagrama de Bode para un Sistema Electroquímico Simple



Fuente: Princeton Applied Research. Application Note AC-1. Basics of Electrochemical Impedance Spectroscopy. En: Princeton Applied Research. Application Note CORR-1. 1987, p. 6

El argumento de Bode tiene algunas ventajas distintas sobre el diagrama de Nyquist. Dado que la frecuencia aparece como uno de los ejes, es fácil entender desde la gráfica cómo la impedancia depende de la frecuencia. La gráfica usa el logaritmo de la frecuencia para permitir que un muy amplio rango de frecuencias sea trazado en una gráfica, pero con cada década dado el mismo peso. El diagrama de Bode también muestra la magnitud ($|Z|$) en un eje logarítmico para que pueda representar fácilmente rangos de impedancia amplios en el mismo conjunto de ejes. Esto puede ser una ventaja cuando la impedancia depende fuertemente de la frecuencia, como es el caso de un condensador.

La curva $\log |Z|$ frente a $\log \omega$ puede dar valores de R_p y R_Ω . A las frecuencias más altas mostradas en la **Figura 16**, la resistencia óhmica domina la impedancia y se puede leer el logaritmo (R_Ω) desde la meseta horizontal de alta frecuencia. En las frecuencias más lejanas, la resistencia a la polarización también contribuye, y el logaritmo ($R_\Omega + R_p$) se puede leer desde la meseta horizontal de baja frecuencia. A frecuencias intermedias, esta curva debe ser una línea recta con una pendiente de -1. Extrapolando esta línea al eje $\log |Z|$ en $\omega = 1$ ($\log \omega = 0$, $f = 0,16$ Hz) proporciona el valor de C_{DL} de la relación:

$$|Z| = 1/C_{DL} \quad (10) \text{ donde}$$

$$\omega = 2\pi f$$

El formato del diagrama de Bode también muestra el ángulo de fase, θ . En los límites de frecuencia alta y baja, donde el comportamiento de la celda de Randles es similar a la resistencia, el ángulo de fase es casi cero. A frecuencias intermedias, θ aumenta a medida que aumenta el componente imaginario de la impedancia.

El gráfico θ frente a $\log \omega$ produce un pico en ω ($\theta = \text{MAX}$), la frecuencia, en radianes, en la que el desplazamiento de fase de la respuesta es máximo. La capacitancia de doble capa, C_{DL} , se puede calcular a partir de la Ecuación 11

$$\omega (\theta = \text{MAX}) = \sqrt{(1 / C_{DL} R_p) (1 + R_p / R_{\Omega})} \quad (11)$$

Observe que tanto R_p como R_{Ω} aparecen en esta ecuación. Es importante recordar que esta frecuencia no será la misma que la frecuencia con la que el diagrama de Nyquist alcanza su máximo.

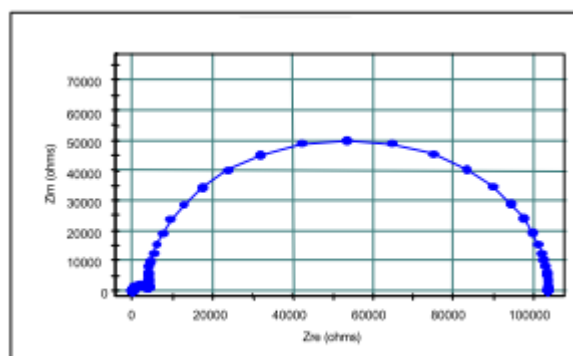
El diagrama de Bode es una alternativa útil al diagrama de Nyquist. Le permite evitar los tiempos de medición más largos asociados con las determinaciones R_p de baja frecuencia. Además, el diagrama del $\log |Z|$ vs $\log \omega$ a veces permite una extrapolación más efectiva de los datos de frecuencias más altas.

El formato de Bode también es deseable cuando la dispersión de datos impide un ajuste adecuado del semicírculo de Nyquist. En general, el diagrama de Bode proporciona una descripción más clara del comportamiento dependiente de la frecuencia del sistema electroquímico que el diagrama de Nyquist, en el que los valores de frecuencia están implícitos en lugar de explícitos.

En algunos procesos electroquímicos, hay más de un paso para determinar la velocidad. Cada paso representa un componente de impedancia del sistema y contribuye a la constante de velocidad de reacción completa. El experimento de impedancia electroquímica a menudo puede distinguir entre estas etapas y proporcionar información sobre sus respectivas velocidades o tiempos de relajación.

La **Figura 17** es típica de múltiples diagramas de Nyquist de tiempo constante —. Mientras que una inspección cercana revela dos semicírculos, uno de los semi-círculos es mucho más pequeño que el otro, lo que hace difícil reconocer constantes de tiempo múltiples.

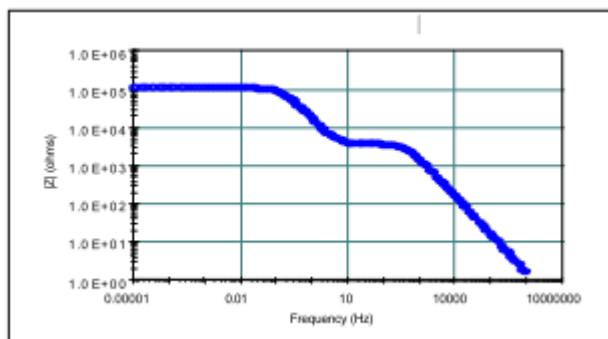
Figura 17. Diagrama de Nyquist para una celda de tiempo constante



Fuente: Princeton Applied Research. Application Note AC-1. Basics of Electrochemical Impedance Spectroscopy. En: Princeton Applied Research. Application Note CORR-1. 1987, p. 7

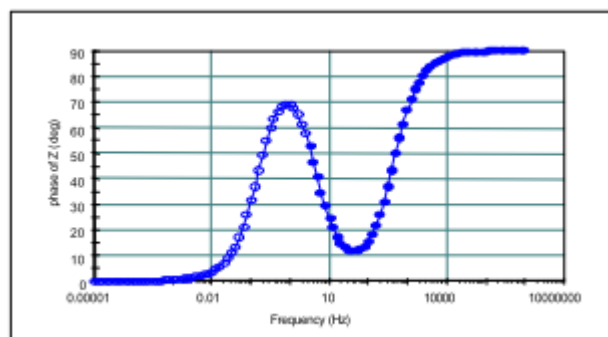
La **Figura 18** y **Figura 19** muestran diagramas de Bode para los mismos datos que se muestran en la **Figura 17**. El formato de diagrama de Bode le permite identificar fácilmente los puntos de rotura de frecuencia asociados con cada paso limitante.

Figura 18. Diagrama de Bode para una celda constante de dos tiempos (Impedancia vs. Frecuencia)



Fuente: Princeton Applied Research. Application Note AC-1. Basics of Electrochemical Impedance Spectroscopy. **En:** Princeton Applied Research. Application Note CORR-1. 1987, p. 7

Figura 19. Diagrama de Bode para una celda constante de dos tiempos (fase angular vs. Frecuencia)

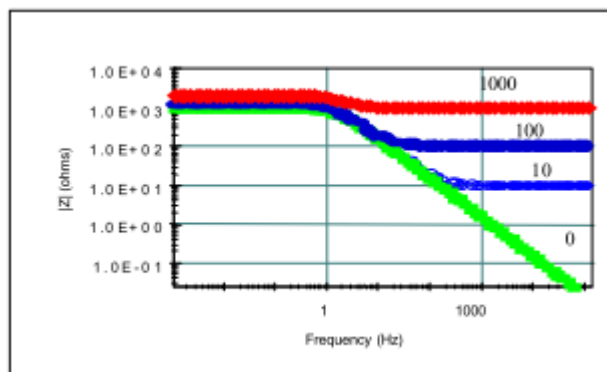


Fuente: Princeton Applied Research. Application Note AC-1. Basics of Electrochemical Impedance Spectroscopy. **En:** Princeton Applied Research. Application Note CORR-1. 1987, p. 8

El diagrama de Bode también tiene algunas desventajas. La mayor es que la forma de las curvas puede cambiar si los valores del circuito cambian. La **Figura 20** y **Figura 21** muestran los diagramas de Bode para varios circuitos similares. Las únicas diferencias son los valores de la resistencia no compensada. Obsérvese que la ubicación ($\theta = \text{MAX}$) y la altura de la fase máxima depende del valor de R_Ω . Observe también que la pendiente de la parte central del diagrama $\log |Z|$ es influenciado por el valor de R_Ω también. El valor de R_Ω puede tener un efecto en los valores de capacitancia calculados a partir de la ecuación 1. Los diagramas de Nyquist correspondientes tienen la misma forma de semicírculo (véase la **Figura 22**)¹⁵.

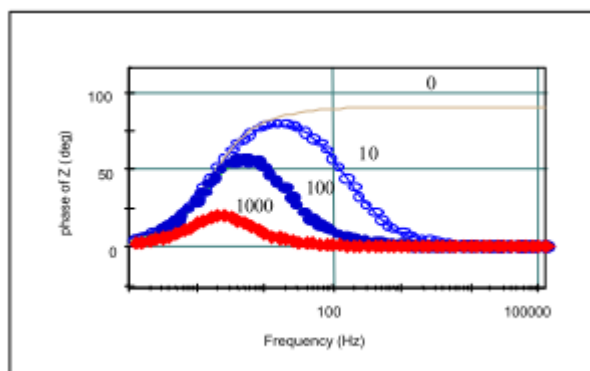
¹⁵ Ibid., p. 7-8.

Figura 20. Diagrama de Bode para los valores seleccionados de $R\Omega$ (Impedancia vs. Frecuencia)



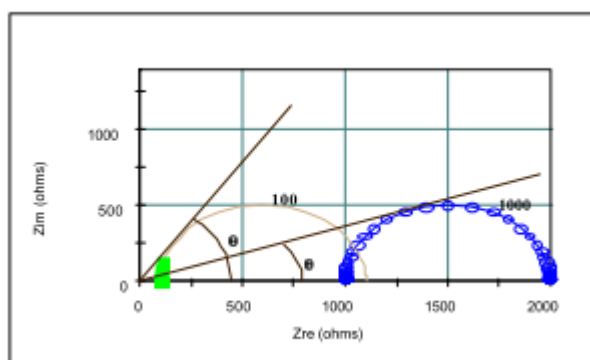
Fuente: Princeton Applied Research. Application Note AC-1. Basics of Electrochemical Impedance Spectroscopy. En: Princeton Applied Research. Application Note CORR-1. 1987, p. 8

Figura 21. Diagrama de Bode para los valores seleccionados de $R\Omega$ (Fase Angular vs. Frecuencia)



Fuente: Princeton Applied Research. Application Note AC-1. Basics of Electrochemical Impedance Spectroscopy. En: Princeton Applied Research. Application Note CORR-1. 1987, p. 8

Figura 22. Diagrama de Nyquist para diferentes valores de $R\Omega$



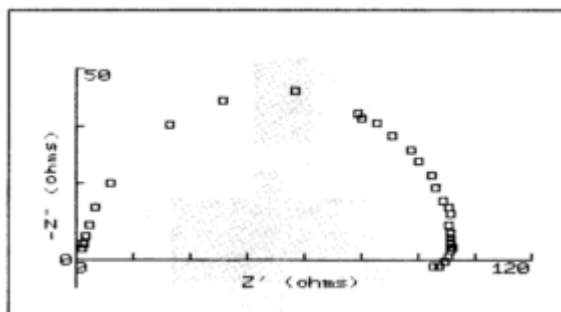
Fuente: Princeton Applied Research. Application Note AC-1. Basics of Electrochemical Impedance Spectroscopy. En: Princeton Applied Research. Application Note CORR-1. 1987, p. 8

2.3.6.3 Interpretación de los datos. Aunque los experimentos de circuitos equivalentes simples generan resultados relativamente sencillos, los análisis electroquímicos típicos producen diagramas más complicados. Estas complejidades surgen porque los circuitos equivalentes simples no describen completamente los fenómenos físicos de un sistema electroquímico. Sin embargo, los modelos de circuitos equivalentes sencillos son frecuentemente buenas aproximaciones de los sistemas reales, y los datos pueden ajustarse a menudo para obtener resultados de exactitud razonable.

Varios programas de computadora se han escrito para ajustar datos experimentales a un modelo de circuito equivalente simple. Debido a la complejidad de este problema, todos estos programas requieren algunas conjeturas iniciales para los parámetros del circuito.

La **Figura 23** muestra un gráfico de Nyquist para una muestra de hierro en H_2SO_4 1N desaireado. Tenga en cuenta que el diagrama no es un semicírculo perfecto, que tiene una curvatura adicional a bajas frecuencias.

Figura 23. Diagrama de Nyquist del hierro en 0,1 N H_2SO_4 des aireado después de 4 horas de inmersión.



Fuente: Princeton Applied Research. Application Note AC-1. Basics of Electrochemical Impedance Spectroscopy. En: Princeton Applied Research Application Note CORR-1. 1987, p. 10

Esta distorsión ha sido atribuida al comportamiento inductivo del sistema electroquímico.

Se han propuesto varios tratamientos analíticos para este diagrama. La mayoría de los investigadores creen que es incorrecto interpretar cualquiera de las intercepciones reales del eje Z de baja frecuencia como la suma de R_Ω y R_p . En su lugar, utilizan varias técnicas de ajuste de curvas para obtener estos valores.

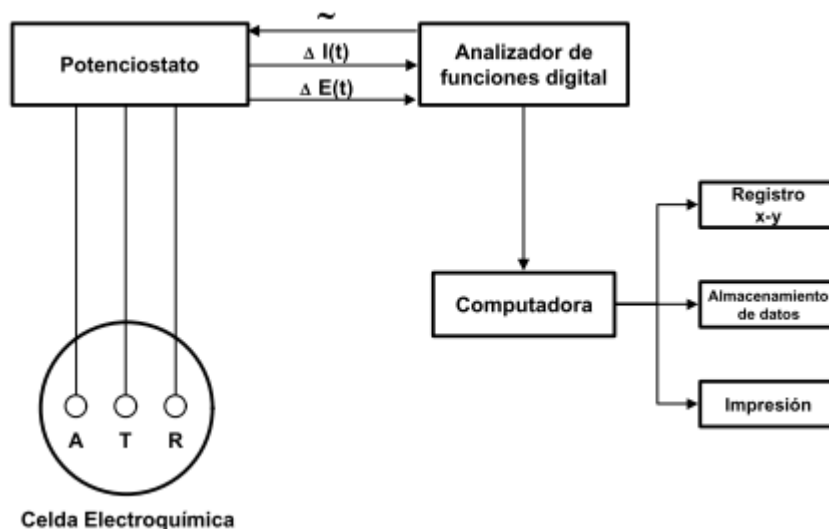
El diagrama de Nyquist en la **Figura 23** revela otra complejidad. En este diagrama, el centro del círculo no miente en el eje x, pero debajo de él. Para explicar este fenómeno de semicírculo deprimido, algunos investigadores usan modelos que asumen que la superficie del electrodo no es homogénea. Usando este modelo, se puede caracterizar diferentes áreas de la superficie con diferentes constantes de tiempo. En este caso, la impedancia total de la

superficie sería la combinación paralela de estas áreas. Puede utilizar varios sub-circuitos RC en paralelo para modelar la impedancia¹⁶.

2.3.7 Instrumentación. La instrumentación electrónica básica, que permite obtener los espectros de impedancia de un sistema electroquímico, está constituida por un generador/analizador de funciones (conocido como FRA por sus siglas en inglés “frequency response analyser” o “lock-in amplifier”), el cual puede analizar o aplicar señales sinusoidales, en un amplio rango de frecuencias, a un potenciostato de alta velocidad de respuesta y sensibilidad (ver **Figura 24**).

El potenciostato aplica la señal de sinusoidal correspondiente al electrodo de trabajo en la celda electroquímica. La respuesta del electrodo mediada por el potenciostato es alimentada a un analizador de funciones digital el cual determina la respuesta de impedancia y el ángulo de fase correspondientes a cada frecuencia estudiada. No obstante que es posible utilizar un potenciostato manual, de manera general, la captura o registro de los datos, el almacenamiento y la manipulación de los mismos se efectúa en una computadora dedicada.

Figura 24. Representación esquemática de la instrumentación utilizada en estudios de EIS. A = electrodo auxiliar, T = electrodo de trabajo, R = electrodo de referencia.



Fuente: MENDOZA FLORES, Juan; DURAN ROMERO, Rubén y GENESCÁ LLOGUERAS, Joan. Espectroscopia de Impedancia Electroquímica en Corrosión, Notas de Clase. Instituto Mexicano del Petróleo, Facultad de Química UNAM. 2012, p. 30.

La tecnología actual permite realizar estudios de EIS en sistemas electroquímicos con relativa sencillez. Los programas de cómputo disponibles simplifican considerablemente la operación de los equipos electrónicos y, en

¹⁶ Ibid., p. 10.

general, requieren únicamente de la definición de unos cuantos parámetros por parte del usuario. Lo anterior ha hecho que la obtención experimental de espectros de impedancia sea relativamente sencilla¹⁷.

¹⁷ MENDOZA FLORES. Op. Cit., p. 30

3. ESTADO DEL ARTE

A continuación se hacen consideraciones sobre tres temas específicos, el primero sobre las últimas investigaciones desarrolladas que se encontraron sobre el efecto del oxígeno en la corrosión de los sistemas de inyección donde se describe brevemente sus resultados, el segundo sobre las tecnologías que se están utilizando en las más recientes investigaciones para evaluación de inhibidores de corrosión y tercero los tratamientos químicos en pozos de inyección y disposición de agua.

3.1 EFECTO DEL OXÍGENO EN LA CORROSIÓN

- Eggum, T., Tajallipour, N., Arumugam, S., & Teevens, P. (2015)¹⁸ desarrollaron un modelo de enfoque integral para determinar la corrosión por oxígeno en entornos acuosos para aguas de mar y aguas producidas de campos petrolíferos que utiliza las condiciones de concentración de oxígeno, velocidades de flujo, temperaturas, etc., para el cálculo de la velocidad de corrosión; los resultados obtenidos fueron comparados con trabajos previos de modelos empíricos basados en experimentos, métodos mecanísticos y semi-empíricos con los cuales se correlaciona muy bien.

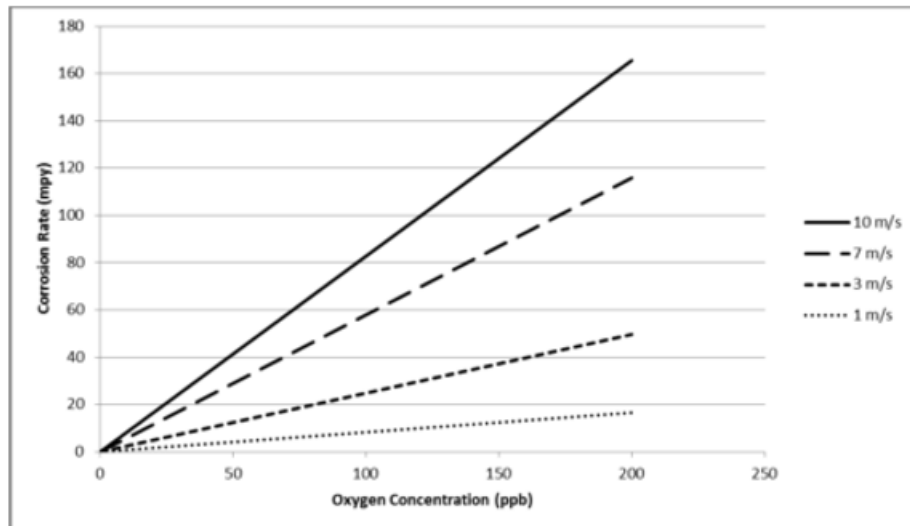
El método planteado por los autores en resumen modela un proceso controlado por difusión con una dependencia de la temperatura de varios de los parámetros clave, incluyendo la velocidad de difusión y la viscosidad, también requiere un cálculo exacto del tamaño de la capa límite de superficie que el oxígeno debe difundir a través (se basa en una versión modificada de la ecuación de Colebrook-Moody) y por último, dan un método que permite utilizar los modelos para predecir una pérdida acumulada de metal sobre todo el tiempo de funcionamiento del equipo.

Los resultados del modelo se observan en la **Figura 25** donde se muestra la velocidad de corrosión en función de la concentración de oxígeno disuelto, tal como se predice por el modelo limitado de velocidad de difusión de oxígeno. La familia de curvas representa diferentes caudales de 1 a 10 m/s, un rango apropiado para los sistemas de inyección de agua. Se destacan dos tendencias claras predichas por el modelo; La velocidad de corrosión aumenta monótonicamente con la concentración de oxígeno, y aumenta monótonicamente con el caudal. Por debajo de 10 ppb de oxígeno disuelto una amplia gama de caudales son aceptables y conducirá a tasas de corrosión de baja a moderada, y que por encima de 50 ppb casi cualquier caudal razonable conduce a la corrosión severa¹⁹.

¹⁸ EGGUM, T., TAJALLIPOUR, N., ARUMUGAM, S., & TEEVENS, P. Comprehensive Approach to Oxygen Corrosion Analysis of Water Injection Systems. En: NACE Corrosion Conference & Expo 2015. 2015. Paper No. 5962, p. 1–11

¹⁹ Ibid., p. 5.

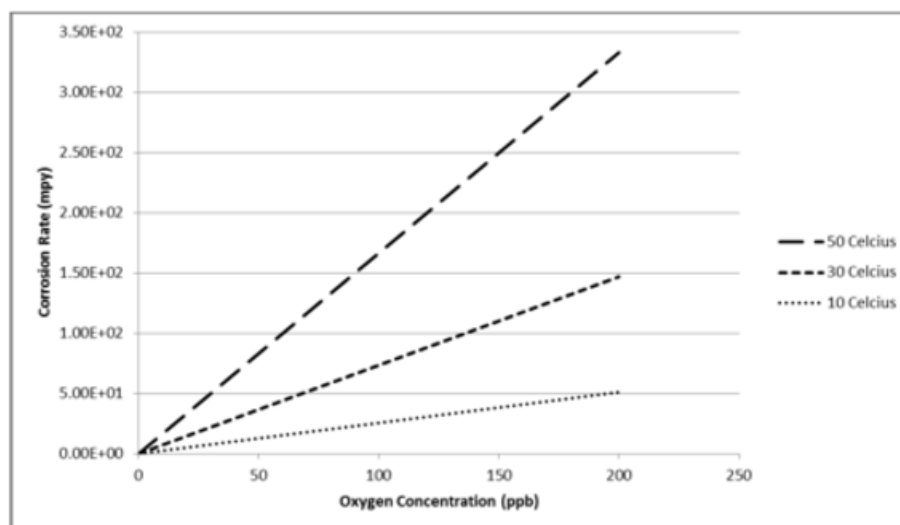
Figura 25. Tasa de corrosión como una función de la concentración de oxígeno disuelto y la tasas de flujo de inyección producto del modelo mecanístico.



Fuente: EGGUM, T., TAJALLIPOUR, N., ARUMUGAM, S., & TEEVENS, P. Comprehensive Approach to Oxygen Corrosion Analysis of Water Injection Systems. En: NACE Corrosion Conference & Expo 2015. 2015. Paper No. 5962, p. 7

Los autores mencionan igualmente que las tasas de corrosión dependen de la temperatura, con un aumento de la temperatura que conduce a un aumento de la tasa de corrosión como se observa en la **Figura 26**. Esto surge de un aumento en la velocidad de difusión de oxígeno a la superficie, una disminución en la cantidad de energía que necesita ser añadida para alcanzar la energía de activación para la reacción electroquímica y cambios en la viscosidad del fluido.

Figura 26. Tasa de corrosión como una función de la concentración del oxígeno disuelto y la temperatura del fluido a 7m/s de tasa de flujo, producto de un modelo mecánico.



Fuente: EGGUM, T., TAJALLIPOUR, N., ARUMUGAM, S., & TEEVENS, P. Comprehensive Approach to Oxygen Corrosion Analysis of Water Injection Systems. En: NACE Corrosion Conference & Expo 2015. 2015. Paper No. 5962, p. 8

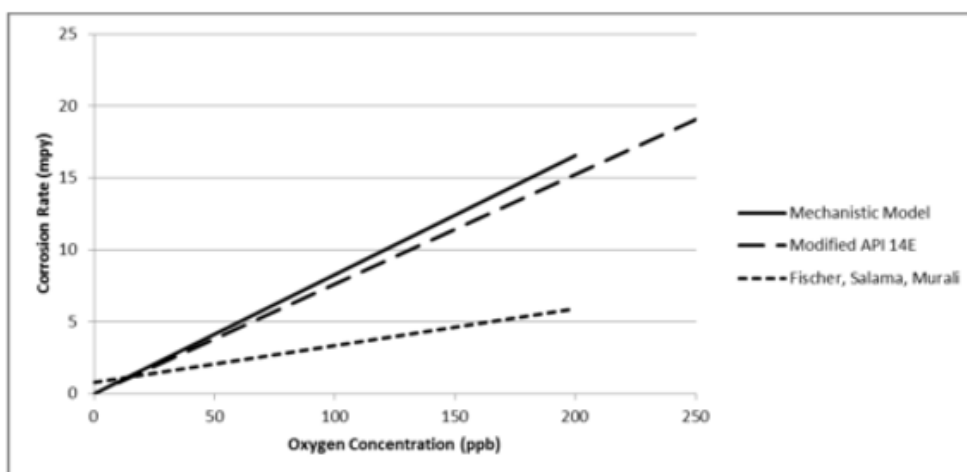
Basándose en los datos disponibles (mediciones en línea de oxígeno disuelto, caudales, temperaturas y otros parámetros operativos), se pueden evaluar los daños acumulados de estos mecanismos y hacer predicciones de vida remanentes. La Práctica Estándar de la NACE para el Control y Monitoreo de Corrosión en Sistemas de Inyección de Agua de Mar (SP0499 - 2012) recomienda menos de 50 ppb de oxígeno disuelto, menos de 6 m / s de velocidad de flujo, y para líneas de acero al carbono, predice una vida útil de cinco a siete años antes que las reparaciones son necesarias. Al comprender las interacciones de los parámetros críticos de funcionamiento identificados, un análisis de este tipo permitirá al operador optimizar las condiciones de funcionamiento, los protocolos de tratamiento de inhibidores y biocidas y, en última instancia, prolongar la vida útil de las instalaciones de inyección de agua.

El modelo de predicción de la corrosión interna (ICPM, por sus siglas en inglés) es una herramienta que se utiliza cada vez más para determinar la tasa de pérdida de metales en estos sistemas y dado que no es intrusiva, no requiere el apagado del equipo de proceso. Los modelos mecánicos y semi-empíricos permiten al operador no sólo predecir la tasa de pérdida de metal, sino comprender los mecanismos subyacentes que conducen a la pérdida de metales y el efecto del cambio de parámetros críticos en esa tasa. Estos métodos permiten predecir el efecto de cambios que nunca se han hecho antes sin tener que volver a ejecutar experimentos o intentar aproximaciones de ensayo y error²⁰.

²⁰ Ibid., p. 2.

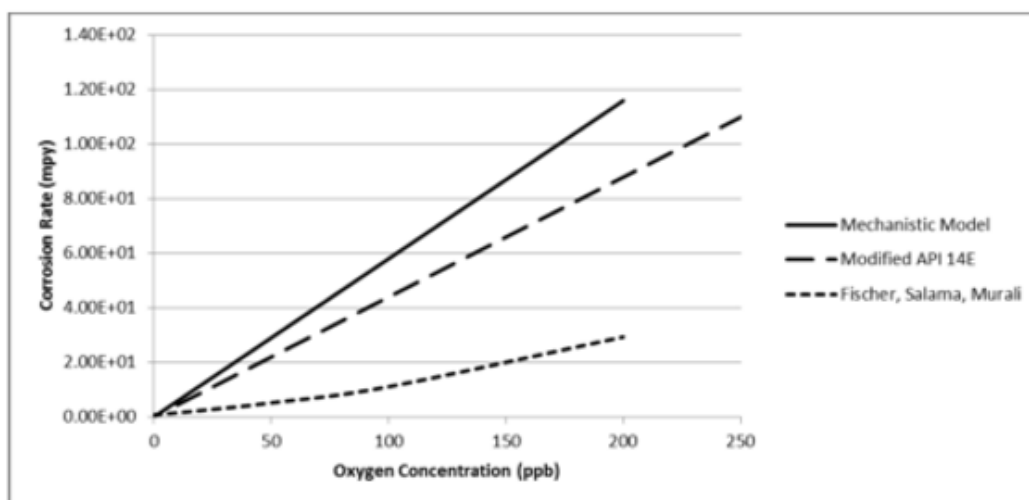
A continuación se presenta la correlación entre los modelos semi-empíricos de Salama, el de erosión-corrosión de API 14E y el modelo mecanístico desarrollado para dos tasas de flujo una de 1 m/s y otra de 7 m/s ver **Figura 27** y **Figura 28**.

Figura 27. Comparación de modelos mecanístico, erosión – corrosión con un modelo semi-empírico para una tasa de flujo de inyección de 1 m/s.



Fuente: EGGUM, T., TAJALLIPOUR, N., ARUMUGAM, S., & TEEVENS, P. Comprehensive Approach to Oxygen Corrosion Analysis of Water Injection Systems. En: NACE Corrosion Conference & Expo 2015. 2015. Paper No. 5962, p. 9

Figura 28. Comparación de modelos mecanístico, erosión – corrosión con un modelo semi-empírico para una tasa de flujo de inyección de 1 m/s.



Fuente: EGGUM, T., TAJALLIPOUR, N., ARUMUGAM, S., & TEEVENS, P. Comprehensive Approach to Oxygen Corrosion Analysis of Water Injection Systems. En: NACE Corrosion Conference & Expo 2015. 2015. Paper No. 5962, p. 7

Los modelos empíricos son realmente las curvas más adecuadas que coinciden con los datos observados, pero sólo para las condiciones dadas de los experimentos. No proporcionan información para orientar la interpretación de los resultados cuando las condiciones de operación son diferentes de las condiciones experimentales originales (y no deben ser extrapoladas), o información sobre los procesos físicos y químicos que causan la pérdida de metal. Los modelos mecanicistas, en el otro extremo del espectro, se desarrollan a partir de principios físicos, químicos, termodinámicos, fluidos u otros principios científicos y se construyen a partir de una comprensión de los procesos que subyacen al comportamiento observado. A menudo son muy conservadores en sus predicciones y la modificación de comportamientos no ideales puede llegar a ser muy compleja. Los modelos semi-empíricos comienzan como mecanicistas y luego se modifican mediante el uso de coeficientes para hacer coincidir datos experimentales o de campo. Los modelos mecanicistas y semi-empíricos conducen a una comprensión mucho más profunda del efecto de todos los parámetros que afectan a la corrosión y a la erosión-corrosión y permiten a los consultores proporcionar mejores consejos y a operadores para tomar mejores decisiones de integridad del sistema.

De estos resultados y de los resultados previamente publicados se desprende que mantener una concentración de oxígeno disuelto inferior a 10 ppb es crítico para evitar la pérdida de metal severa. Esto no siempre es posible debido a trastornos del sistema, fallos en el equipo y posible secuestro rutinario de oxígeno durante la aplicación de biocidas debido a diferencias de compatibilidad, lo que también puede conducir a una erosión-corrosión mucho mayor si hay cloro residual. Durante estas excursiones de oxígeno incrementado, las tasas de pérdida de metal pueden ser muy altas, por lo que es fundamental que los operadores estén conscientes y tomen decisiones operativas plenamente conscientes de los efectos sobre la integridad de los componentes.

3.2 TÉCNICAS PARA EVALUACIÓN DE INHIBIDORES

En artículos publicados recientemente sobre el segundo tema a desarrollar sobre los métodos de evaluación de inhibidores de corrosión se encuentra que diferentes autores analizan las propiedades físicas del inhibidor cuando la investigación se orienta a proponer un nuevo inhibidor al mercado, también se analiza el efecto inhibidor por diferentes técnicas electroquímicas para comprobar si efectivamente el inhibidor disminuye la velocidad de corrosión e indagar cual es la concentración específica más efectiva sobre la solución corrosiva y por último se caracteriza la superficie corroída para ver como disminuye la corrosión, como también los productos de corrosión. A continuación se dan ejemplos de las técnicas utilizadas por varios autores en sus investigaciones más recientes y sus resultados principales:

- Pullas Rivera, D. F.²¹ por ejemplo, utilizó el método Wheel Test para evaluar un nuevo inhibidor, este método utiliza una caja de temperatura controlada con una rueda giratoria a la que se juntan botellas que contienen las muestras de ensayo, es decir, piezas metálicas en un ambiente corrosivo líquido en ausencia de oxígeno. Los resultados se basaron únicamente en la pérdida de peso y el examen visual de la muestra de ensayo en un ambiente corrosivo. El fluido corrosivo usualmente es preparado para simular las condiciones del agua de formación, utilizando salmueras sintéticas y aceites refinados para simular las proporciones de agua y petróleo en el caso de pozos productores.
- Abd El-Lateef, H. M., Abu-Dief, A. M., & Mohamed, M. A. A.²² por ejemplo, en su investigación evaluaron 3 nuevos inhibidores que fueron sintetizados, caracterizaron sus estructuras cristalinas por medio de rayos X, determinaron igualmente los puntos de fusión y las mediciones espectrales de los inhibidores, analizaron el C, H y N. El espectro infrarojo fue registrado en un espectrofotómetro FT-IR, el espectro de Resonancia Magnética Nuclear NMR fue medido en un espectrómetro FT-NMR para determinar la estructura molecular, el espectro de masa se registró en un espectrómetro de masa y el espectro de absorción se registró en un espectrofotómetro visible UV.

Se investigó igualmente el efecto inhibidor de corrosión de cada inhibidor viendo sus efectos en un acero al carbono con una solución 15% HCl por medio de mediciones electroquímicas, se utilizó una celda de vidrio que consta de 3 electrodos, un electrodo de acero al carbón C1018 que se utilizó como electrodo de trabajo, un electrodo de platino y otro de calomel saturado SCE que se usaron como electrodos de referencia. Todas las mediciones electroquímicas fueron llevadas a cabo usando un Potenciostato/galvanostato VersaSTAT4, se tomaron las medidas de potencial a circuito abierto luego de 60 min de estabilización y posteriormente se llevaron a cabo las mediciones de polarización a un potencial de ± 250 mV vs el potencial de corrosión (E_{corr}) a una velocidad de barrido de 1 mV/s a 45 y 60 grados centígrados.

Las mediciones de EIS - Espectroscopia de impedancia electroquímica se realizaron con un amplificador de fase sensible (Model-5208) accionado mediante el uso del potenciostato / galvanostato Versa-STAT4 con un analizador de respuesta de frecuencia (FRA) contenido en una sola unidad y conectado a un sistema informático.

²¹ PULLAS RIVERA, D. F. Formulación Y Evaluación En Laboratorio De Un Nuevo Inhibidor De Corrosión Para Ductos En Campos Petroleros. Quito. Universidad Central del Ecuador, 2015, p. 19.

²² ABD EL-LATEEF, H. M., ABU-DIEF, A. M., & MOHAMED, M. A. A. Corrosion inhibition of carbon steel pipelines by some novel Schiff base compounds during acidizing treatment of oil wells studied by electrochemical and quantum chemical methods. En: Journal of Molecular Structure. Octubre, 2016. vol. 1130, p. 522–542.

En dicha investigación posteriormente, para obtener información sobre los cambios en la superficie de las muestras corrosivas antes y después de la introducción de los inhibidores, se analizó la morfología de las muestras ensayadas utilizando espectroscopia de dispersión de energía (EDX) en el microscopio electrónico de barrido (SEM) (SEM / EDX) (JEOL, modelo 5300). Se determinó la velocidad de corrosión por medio de probetas de resistencia a la polarización lineal LPR y curvas Tafel. Adicionalmente se llevaron a cabo mediciones químicas cuánticas para estudiar la relación entre la estructura de los inhibidores y su eficiencia.

Los resultados de esta investigación mostraron que el poder inhibidor aumentó con el incremento de la concentración y la temperatura y se encontró que la adsorción de los inhibidores sobre la superficie de acero obedecía a la isoterma de adsorción de Langmuir y a la quimisorción. Los cálculos químicos cuánticos proporcionan un buen apoyo a los resultados empíricos.

3.3 TRATAMIENTOS QUÍMICOS EN POZOS DE INYECCIÓN

Los pozos de inyección requieren usualmente de la gestión de programas de tratamientos químicos para asegurar su integridad, dichos tratamientos se pueden clasificar desde varias ópticas como por ejemplo los requeridos para proteger los equipos y materiales del pozo (bombas de subsuelo, empaques y tuberías, etc.), o los requeridos para asegurar los parámetros de inyectividad en la formación cuando baja la permeabilidad, estos tratamientos químicos suelen ser muy diferentes y tiene que verificarse el impacto del uno en el otro y viceversa.

M.A. Awan and S. M. Al-Khaledi²³ (2014) mencionan que los productos químicos se pueden clasificar en tres grupos:

- Los químicos que tratan la producción: Se inyectan a los fluidos producidos y a la fuente de agua inyectada.
- Los químicos para el procesamiento de gas: Los utilizados en campos con gas para bajar el punto de congelación, el endulzamiento y deshidratación del gas producido.
- Los químicos de estimulación y Workover: Consisten en ácidos y salmueras densas junto con sus aditivos asociados.

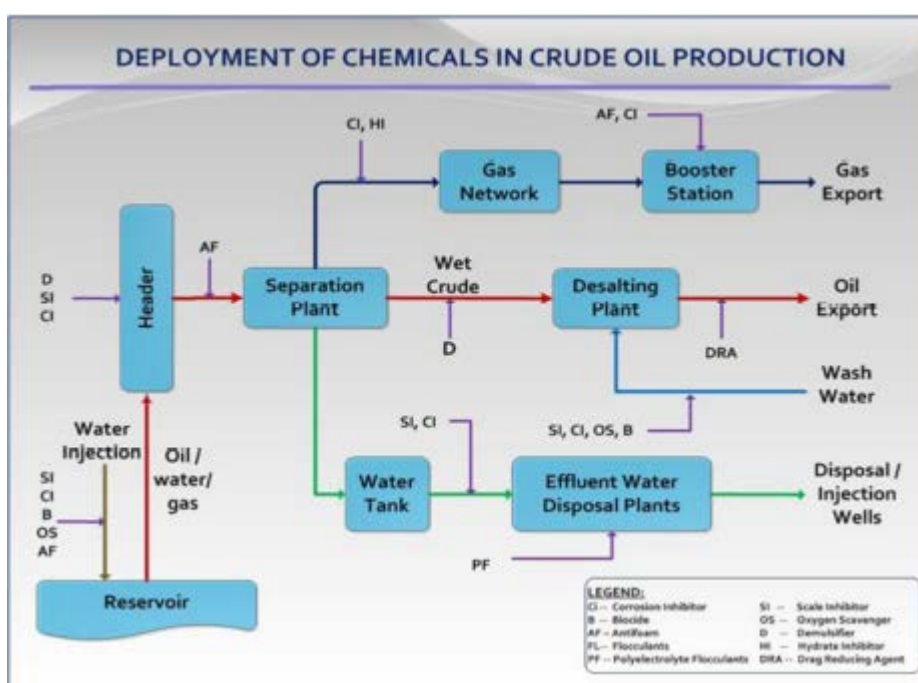
A continuación trataremos los grupos 1 y 3 que tienen que ver específicamente con los pozos de inyección de agua.

²³ AWAN, M. A., & AL-KHALEDI, S. M. Chemical treatments practices and philosophies in oilfields. Society of Petroleum Engineers. En: SPE International Conference and Exhibition on Oilfield Corrosion 2014: New Challenges for a New Era. Mayo, 2014. SPE-169626-MS, p. 1-14.

3.3.1 Productos químicos para el tratamiento de aguas de inyección. M.A. Awan and S. M. Al-Khaledi²⁴ tratan en su investigación que los productos químicos que usualmente se aplican en los pozos para inyección de agua son: Inhibidores de Incrustaciones, Inhibidores de Corrosión, Biocidas, Secuestrante de Oxígeno y para el agua de disposición en pozos adicionalmente se pueden adicionar Floculantes en la planta de tratamiento previo a la inyección, lo anterior se muestra en la **Figura 29**.

Estos productos químicos corresponden con formulaciones vendidas por compañías químicas y contienen materiales distintos de un solo compuesto, sin embargo dentro de su complejidad tienen un grupo funcional central que define el tipo de químico genérico y como mínimo habrá un solvente.

Figura 29. Empleo de productos químicos en la producción de petróleo.



Fuente: AWAN, M. A., & AL-KHALEDI, S. M. Chemical treatments practices and philosophies in oilfields. Society of Petroleum Engineers. En: SPE International Conference and Exhibition on Oilfield Corrosion 2014: New Challenges for a New Era. Mayo, 2014. SPE-169626-MS, p. 1-14

3.3.1.1 Inhibidores de Corrosión. El uso de inhibidores de corrosión es un método para controlar la corrosión y minimizar los daños internos de los equipos y tuberías. Los compuestos comúnmente utilizados son amida /imidazolina, amina o sales de amina, aminas cuaternarias y tipos de amina heterocíclica²⁵.

²⁴ Ibid., p. 1.

²⁵ Ibid., p. 4.

En los últimos años se han venido desarrollado nuevos inhibidores a base de fosfatos inorgánicos para aguas salinas con buenos resultados²⁶ y otros inhibidores amigables con el medio ambiente denominados “inhibidores verdes”, estos inhibidores pertenecen al campo avanzado de "Química Verde" también conocida como química sostenible. Se clasifican en tipos anódico, catódico o mixto según su mecanismo de protección. Los inhibidores verdes especiales se obtienen de plantas que crecen en regiones desérticas del estado de Baja California, México, mediante extracción etanólica y acuosa.²⁷

Los inhibidores solubles en agua se usan en operaciones de tratamiento de agua e inyección. Se requiere un tratamiento continuo de 20-30 ppm para los tratamientos de crudo y agua, mientras que el gas puede requerir hasta 100 ppm, con base en sus contenidos líquidos²⁸.

3.3.1.2 Inhibidores de Incrustaciones. La formación de incrustaciones es un fenómeno común en las operaciones petroleras. Las incrustaciones comunes que se encuentran en las aguas a inyectar son los carbonatos, bicarbonatos, sulfatos de Ca, Ba y Sr, y óxidos y sulfuros de Fe. Que se formen o no las incrustaciones dependen de variables como los sólidos totales disueltos (TDS), temperatura, presión de operación, pH del agua, presión parcial de gases disueltos, sólidos suspendidos, productos de corrosión, etc,²⁹.

Los inhibidores de incrustaciones inyectados en corrientes de agua en pequeñas cantidades normalmente e 20-30 ppm, retrasan, reducen o previenen la formación de incrustaciones.

El químico inhibidor tiene que estar presente en todo momento para evitar que se depositen las incrustaciones inhibiendo el crecimiento de los cristales de incrustación. Los inhibidores de tipo orgánico son los más utilizados. Los tipos más comunes son los fosfatos y ésteres orgánicos, fosfanatos, polímeros de tipo acrílico, etc. Todas las formulaciones son solubles en agua. Para tratamientos de estimulación en pozos se suelen usar altas concentraciones de 5000 ppm o más³⁰.

3.3.1.3 Biocidas. Las aguas de los campos petroleros pueden contener varios tipos de microorganismos como algas, hongos y bacterias. Las bacterias se multiplican a una velocidad increíble y una sola bacteria puede ser una colonia próspera de millones de bacterias en pocas horas en condiciones muy amplias. Las bacterias

²⁶ DEYAB, M. A., EDDAHAOUI, K., ESSEHLI, R., RHADFI, T., BENMOKHTAR, S., & MELE, G. Experimental evaluation of new inorganic phosphites as corrosion inhibitors for carbon steel in saline water from oil source wells. *En: Desalination*, Enero, 2016. vol. 383, p. 38–45.

²⁷ GARCIA, R., VALDEZ, B., SCHORR, M., & ELIEZER, A. Green Corrosion Inhibitors for Water Systems. *En: NACE Corrosion Conference & Expo 2013*. 2013. Paper No. 2814, p.1–4.

²⁸ AWAN, M. A., & AL-KHALEDI, S. M. Op., cit., p.4.

²⁹ Ibid., p. 5.

³⁰ Ibid., p. 5.

que más preocupan usualmente son las reductoras de sulfato (SRB) dado que son las que causan los problemas más graves en aguas y yacimientos petrolíferos dado que reducen los iones sulfato en agua a iones sulfuro, lo que produce H₂S como subproducto formando o corrosión o ensuciamiento tipo fouling que ocasiona taponamiento en los equipos o en pozos.

Las SRB pueden tener los siguientes efectos: Corrosión por picadura debajo del depósito, incrustaciones, aumentar la corrosividad del agua por la generación del H₂S, agrietamiento. Los biocidas más comunes son los aldehídos, sales de amonio cuaternario y sales de acetato de amina. Todos son solubles en agua y usualmente su tratamiento se realiza por batches usando de forma alternativa varios tipos de biocida para hacer frente a la inmunidad que obtienen las bacterias³¹.

3.3.1.4 Secuestrantes de Oxígeno. El oxígeno es la principal reacción catódica y actúa como precursor de la corrosión, en aguas de inyección 0,5 ppm de O₂ son suficientes para causar problemas de corrosión. Para remover el oxígeno usualmente se realiza mecánicamente a través de un desaierador y posteriormente por métodos químicos a través de secuestrantes de Oxígeno se disminuye el oxígeno disuelto al nivel de trazas.

El secuestrante de oxígeno viene en forma catalizada (sales de cobalto y manganeso) se usan típicamente para sulfito y los catalizadores orgánicos se usan típicamente con el secuestrante de oxígeno volátil (VOS)³².

Los siguientes químicos VOS son ampliamente utilizados: Hidrazina (N₂H₄), Acido Eritorbico (C₆H₈O₆), Carbohidrazina (CH₆N₄O), hidroquinona (C₆H₆O₂), Dietilhidroxilamina (DEHA) (C₂H₅)₂NOH, Metiletilketoxina (C₄H₉NO), Isopropilhidroxilamina (IPHA)³³.

El sulfito de sodio reacciona para formar sulfato de sodio que contribuye al sulfato de los sólidos totales disueltos (TDS)³⁴.

3.3.1.5 Coagulantes y Floculantes. En las plantas de tratamiento previo a la inyección donde se utilizan los procesos de sedimentación, filtración y centrifugación, la separación sólido / líquido se puede mejorar bastante aplicando floculantes sintéticos.

³¹ Ibid., p. 5.

³² JAFFER, A., FULMER, D., ENSSLEN, J., CORPORATION, B. P., & LAND, S. Recent Developments Organic Oxygen Scavenger Technology. En: NACE Corrosion Conference & Expo 2006. 2006. Paper No. 06687, p. 7.

³³ Ibid., p. 2-3.

³⁴ Ibid., p. 3.

Los floculantes solubles en agua incluyen gomas y almidones y sus formulaciones son muy similares a los rompedores inversos, pero no modificados para lograr menor tensión superficial.

Los coagulantes, sales inorgánicas hidrolizables de aluminio (alumbre), se utilizan en el tratamiento del agua. Los coagulantes sintéticos son productos químicos catiónicos y de bajo peso molecular.

Tanto los coagulantes como los floculantes son altamente solubles en agua. La coagulación es básicamente hidrostática y se produce por la reducción del potencial de repulsión de la capa eléctrica, mientras que la floculación se produce por la acción de materiales de alto peso molecular donde la sustancia química forma un puente entre dos o más partículas³⁵.

3.3.2 Productos químicos para mantener inyectividad en pozos disposal. La calidad del agua tiene una gran influencia en la inyectividad de los pozos de inyección y disposal. La mala calidad del agua de inyección o disposición puede comprometer la efectividad de la inyección incluso de formaciones de areniscas o formaciones de carbonato de alta calidad, lo que resulta en fallas económicas y la necesidad de costosos workovers y re-completamientos de manera regular para facilitar las operaciones de inyección³⁶.

El agua residual contiene sólidos en suspensión (por ejemplo, incrustaciones, óxido y otros productos de corrosión) y aceite remanente y otros productos químicos asociados al tratamiento del agua, incluidos desemulsificantes, surfactantes e inhibidores de incrustaciones y corrosión. Las partículas sólidas pueden afectar negativamente a la inyectividad a través de los siguientes cuatro mecanismos: estrechamiento del pozo (invasión de la formación de torta de partículas en el interior del yacimiento, llenado de pozos por sedimentación de partículas y taponamiento de perforaciones). El daño depende del tamaño de partícula de los sólidos y el aceite presente en el agua inyectada y el diámetro promedio de la garganta de poro de la formación. Si las partículas son más grandes que el diámetro promedio de la garganta porosa, las partículas no pueden penetrar los poros.

Como resultado, se formará una torta de filtro externa con una permeabilidad más baja que la de la formación. El grado de obstrucción y el grado de daño por inyectividad dependen de: (a) características de la roca, permeabilidad y porosidad, (b) contenido de aceite y distribuciones de tamaño de gota (c) velocidad de flujo, y (d) sólidos suspendidos totales.

³⁵ AWAN, M. A., & AL-KHALEDI, S. M. Op., cit., p.6.

³⁶ AL-TAQ, A. A., AL-DAHLAN, M. N., & ALRUSTUM, A. A. Maintaining Injectivity of Disposal Wells: From Water Quality to Formation Permeability. En: SPE Middle East Oil & Gas Show and Conference. Society of Petroleum Engineers. Marzo, 2017. SPE-183743-MS, p. 1.

Nasr-El-Din y Al-Taq, (1998) citado por AL-TAQ, A AL-DAHLAN, M. N., & ALRUSTUM, A. A, recomendaron requisitos de calidad del agua para minimizar la pérdida de inyectividad cuando el material suspendido total (sólidos y aceite) no debe exceder 50 ppm, el tamaño medio de partícula no debe exceder 4 micrones, la concentración de sulfuro de hidrógeno no exceda 10 ppm, y la concentración total de hierro no debe exceder 2 ppm³⁷.

La disminución de la capacidad de inyección de los pozos disposal es un fenómeno común debido a la mala calidad del agua de disposición, que impone la necesidad de estimular frecuentemente estos pozos y restaurar así su capacidad de inyección. Se han aplicado con éxito diferentes formulaciones y técnicas de estimulación para eliminar el daño en estos pozos. Entre otros factores, la litología de la formación (carbonato o arenisca) y la naturaleza del daño juegan un papel importante en la selección de recetas y técnicas de estimulación.

Los pozos disposal generalmente se dañan con deposición orgánica / inorgánica. La parte orgánica contiene comúnmente acumulación de petróleo en el área cercana al pozo, y una intensa precipitación de hidrocarburos / asfaltenos. La parte inorgánica incluye incrustaciones, tales como calcita, óxidos de hierro y sulfuros.

Los tratamientos ácidos en formaciones de areniscas difieren significativamente de aquellos realizados en formaciones de carbonato. El ácido reacciona con la roca de carbonato vigorosamente dando como resultado productos solubles en agua. En formaciones de arenisca, se utilizan en la estimulación los ácidos (HF-HCl). Las areniscas comprenden granos de cuarzo, arcilla de diversos tipos, feldespatos, sílex, micas y otros minerales. El ácido clorhídrico no es efectivo para eliminar la mayoría de los constituyentes de las rocas de silicato.

Los pozos disposal en formaciones de carbonato generalmente se tratan con ácido clorhídrico, ácido fórmico, ácido acético o una combinación de estos ácidos.

3.3.3 Tratamientos con Gelificación Insitu. Para yacimientos petrolíferos maduros con cortes de agua superiores al 90% o incluso 95% es muy importante sostener o incluso incrementar la capacidad de inyección para mejorar la recuperación de crudo, se están utilizando técnicas modificadoras de la inyección que por medio de productos químicos que se adicionan al pozo, estos viajan por los canales abiertos permitiendo una vez cerrado el pozo por varios días para favorecer la reacción y permitan formar geles que cierran dichos canales reaccionando con la formación para formar una barrera polimérica al corte de agua³⁸.

³⁷ Ibid., p. 3

³⁸ SPE, G. T., & TAO, C. SPE 87045 To Improve Benefits by Injection Well Treatment. Test. En: SPE International. Society of Petroleum Engineers. SPE 87045. Marzo, 2014, p. 1-5

4. MARCO METODOLOGICO

Mediante el uso de celdas de vidrio se realizarán pruebas a las probetas descritas en el diseño experimental. Los recipientes contendrán soluciones acuosas; se eliminará el oxígeno presente mediante introducción de N₂ durante 30 minutos para las pruebas que no contienen presencia de oxígeno, para el caso de las pruebas que contiene O₂, se realiza una saturación con O₂ gaseoso por un periodo de tiempo de 30 minutos, la temperatura se controlará a través de planchas de calentamiento y verificando con indicadores de temperatura el valor en el interior del recipiente. Se realizarán pruebas electroquímicas LPR, curvas Tafel e Impedancia Electroquímica para determinar la velocidad de corrosión y resistencia electroquímica.

La investigación pretende evaluar las propiedades y eficiencia de tres diferentes inhibidores comerciales en un acero API N 80, las etapas en las cuales se plantea hacer el proyecto son las siguientes:

Tabla 4. Diagrama de las etapas metodológicas del proyecto.

ETAPA	ACTIVIDAD
I	Obtención, preparación de probetas
II	Preparación de soluciones inhibidoras
III	Montaje de celda electroquímica a nivel laboratorio
IV	Pruebas electroquímicas
V	Análisis Morfológico Superficial por Microscopia
VI	Elaboración y presentación productos de difusión

Fuente: Autor

4.1 ETAPAS

4.1.1 Etapa I. Obtención, preparación de probetas. Comprende:

- Ubicación geográfica: el proyecto se desarrollará en los laboratorios del grupo de investigación INCITEMA ubicados dentro de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia donde se encuentran los equipos requeridos para el desarrollo del proyecto.
- Corte y pulido en forma cilíndrica probetas de acero API N 80 a lijas 100, 180, 400, 600 y 1200.
- Caracterización de material

4.1.2 Etapa II. Preparación de soluciones inhibidoras. Conlleva las siguientes actividades:

- Se toman dosificaciones de 0, 10, y 30 ppm.

- Se toman concentración de oxígeno de 0 y 5 ppm.
- Se toman tres diferentes muestras de fluidos como electrolito.

4.1.3 Etapa III. Montaje de celda electroquímica a nivel laboratorio. Conlleva las siguientes actividades:

- Se utiliza un vaso de precipitado de vidrio de 200 ml que se encuentra sobre una estufa para tener una temperatura de 80 °C.
- Se tapa el vaso con una tapa de teflón macizo la cual sostiene los electrodos de trabajo.
- Se ubican y conecta los tres electrodos de trabajo: electrodo de trabajo (API N 80), contra electrodo (platino) y electrodo de referencia (plata-cloruro de plata).
- Se conecta con cables de continuidad eléctrica al computador y se hacen las pruebas con el software GAMRY FRAMWORK.

4.1.4 Etapa IV. Pruebas electroquímicas. Se realizan pruebas electroquímicas luego de 24 horas de reposo para las soluciones dosificadas. Para la evaluación mediante técnicas electroquímicas se utilizó un electrodo de anillo rotatorio, acoplado a un potencióstato-galvanostato, como se muestra en la **Figura 30**.

Figura 30. Electrodo de anillo rotatorio.



Fuente: Autor

Las probetas cilíndricas (electrodos de trabajo) de acero API N 80 serán pulidas hasta generar una superficie libre de rayas.

El potencial de corrosión entre el electrodo de trabajo y el electrodo de referencia (plata/cloruro de plata) será estabilizado durante 1 hora, posteriormente se dejará un tiempo de 4 horas, para que el inhibidor pueda actuar y se genere la inhibición

con la película fílmica en la superficie disminuyendo el deterioro que le ocasiona el electrolito, luego de éste periodo se desarrollaran las pruebas electroquímicas. El análisis de resultados de las técnicas mencionadas permitirá determinar la velocidad de corrosión del material e impedancia electroquímica.

Pruebas electroquímicas que se desarrollaran:

- Resistencia a la Polarización Lineal LPR.
- Pruebas de polarización TAFEL.
- Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIS).

4.1.5 Etapa V. Análisis morfológico superficial por microscopia. Las muestras que se analizarán por microscopía óptica para describir la apariencia superficial de las diferentes probetas sometidas a prueba con la acción de los 3 inhibidores a evaluar en concentración de 0 y 5 ppm de oxígeno y con 0, 10 y 30 ppm de dosificación de inhibidor a la temperatura de 80 °C.

4.1.6 Etapa VI. Elaboración y presentación productos de difusión. Una vez conseguidos los resultados se elaborarán los siguientes productos de difusión:

- Libro del Trabajo de grado y presentación para sustentación
- Ponencia en IX Congreso Internacional de Materiales CIM 2017

4.2 DISEÑO EXPERIMENTAL

A continuación, se establecen las pautas para la selección del Diseño Experimental.

4.2.1 Realización de pruebas de simulación en laboratorio. Para evaluar la eficiencia de los tres inhibidores, se pretende evaluar cada variable independiente y la interacción entre ellas, las podemos ver en la siguiente tabla con sus respectivas combinaciones, para un total de 54 pruebas.

Es necesario realizar un blanco por cambio de las condiciones, esta referencia sirve para las pruebas que tienen los mismos valores de prueba como temperatura, concentración de O₂, la dosificación puede ser diferente de acuerdo a los valores establecidos.

Tabla 5. Resumen de las pruebas de evaluación de los 3 inhibidores en laboratorio

Variables	Inhibidores	Muestras de Fluidos	Dosificaciones (ppm)	Oxígeno (ppm)	Temperatura (°C)
Niveles	LA-3518-C	TRS-N2	0	0	80
	VX-12615	CCS-12	10	5	
	97-VD-129	JGR-12	30		

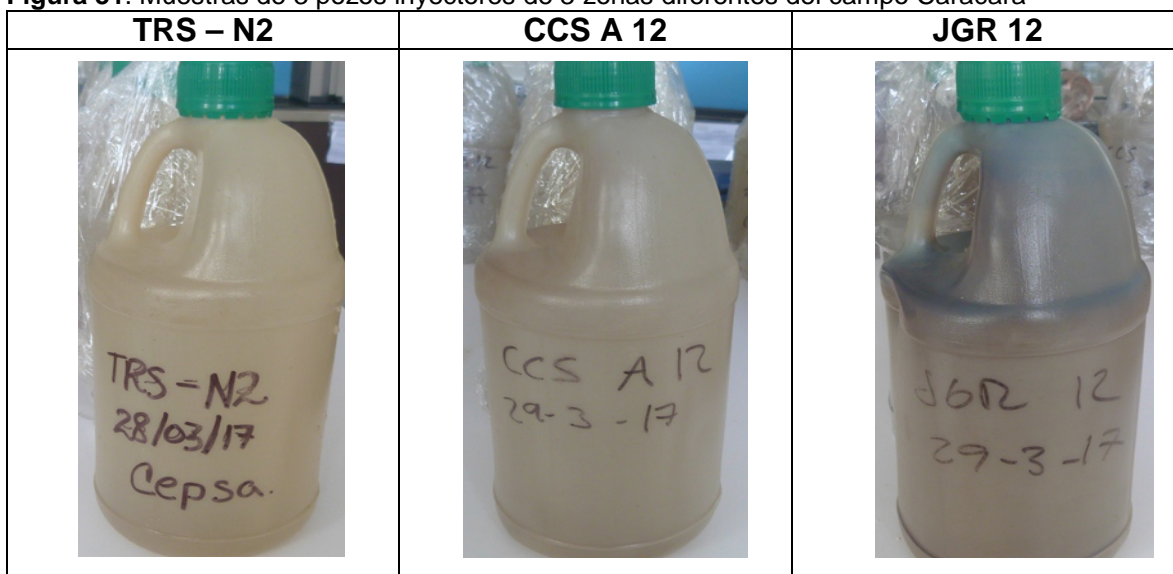
Fuente: Autor

La combinación de las pruebas establece un DISEÑO FACTORIAL MIXTO.

$$(3^2 \times 2 = 18) + (3^2 \times 2 = 18) + (3^2 \times 2 = 18) = 54 \text{ Pruebas}$$

4.2.2 Evaluación de Inhibidores de corrosión. Las muestras que se evaluarán se presentan a continuación en la **Figura 31** :

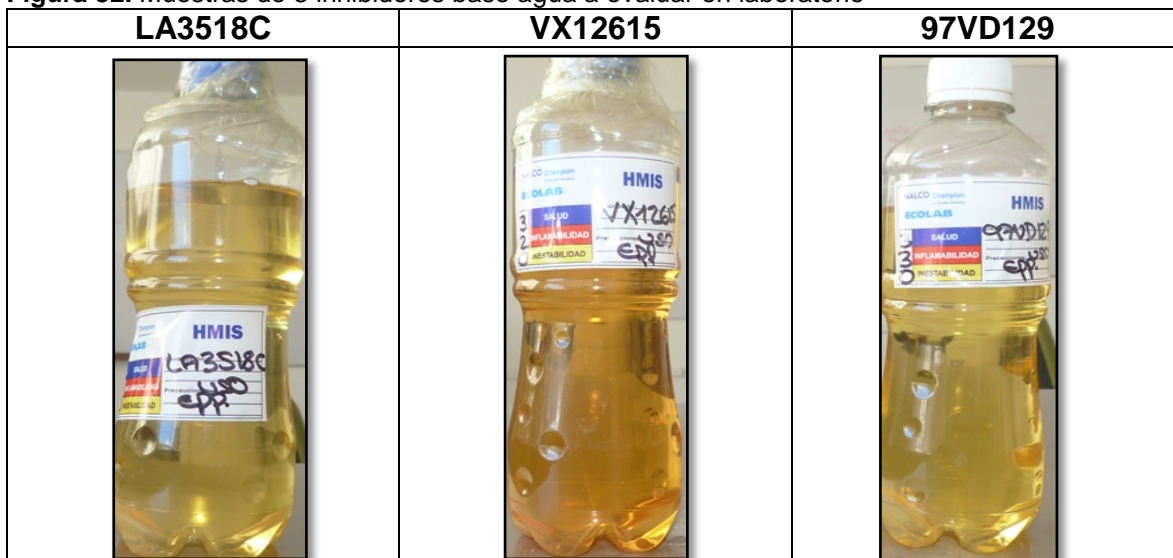
Figura 31. Muestras de 3 pozos inyectoros de 3 zonas diferentes del campo Caracara



Fuente: Autor

Los inhibidores que se evaluarán se presentan a continuación en la **Figura 32**:

Figura 32. Muestras de 3 inhibidores base agua a evaluar en laboratorio



Fuente: Autor

Para cada inhibidor se realizaran pruebas para 3 concentraciones de inhibidor (0, 10 y 20 ppm) con dos condiciones de criticidad del fluido (sin oxígeno y con oxígeno (5 ppm) y a temperatura de 80 °C.

En la **Tabla 6**, **Tabla 7** y **Tabla 8** se detalla para cada uno de los inhibidores las diferentes combinaciones dando un total de 18 pruebas por cada uno con un total de 54 pruebas para los 3 inhibidores.

Tabla 6. Detalle del total de combinaciones a desarrollar en las pruebas de laboratorio para los 3 inhibidores de la muestra de agua del pozo CCS-A12

NUMERO	INHIBIDORES	MUESTRAS DE FLUIDOS	TEMPERATURA °C	OXIGENO ppm	DOSIFICACIONES ppm
1	LA-3518-C	CCSA-12	80	0	0
2			80	0	10
3			80	0	30
4			80	5	0
5			80	5	10
6			80	5	30
7	VX-12615		80	0	0
8			80	0	10
9			80	0	30
10			80	5	0
11			80	5	10
12			80	5	30
13	97-VD-129		80	0	0
14			80	0	10
15			80	0	30
16			80	5	0
17			80	5	10
18			80	5	30

Fuente: Autor

Tabla 7. Detalle del total de combinaciones a desarrollar en las pruebas de laboratorio para los 3 inhibidores de la muestra de agua del pozo TRS-N2

NUMERO	INHIBIDORES	MUESTRAS DE FLUIDOS	TEMPERATURA °C	OXIGENO ppm	DOSIFICACIONES ppm
19	LA-3518-C	TRS-N2	80	0	0
20			80	0	10
21			80	0	30
22			80	5	0
23			80	5	10
24			80	5	30
25	VX-12615		80	0	0
26			80	0	10
27			80	0	30
28			80	5	0
29			80	5	10
30			80	5	30
31	97-VD-129		80	0	0
32			80	0	10
33			80	0	30
34			80	5	0
35			80	5	10
36			80	5	30

Fuente: Autor

Tabla 8. Detalle del total de combinaciones a desarrollar en las pruebas de laboratorio para los 3 inhibidores de la muestra de agua del pozo JGR-12

NUMERO	INHIBIDORES	MUESTRAS DE FLUIDOS	TEMPERATURA °C	OXIGENO ppm	DOSIFICACIONES ppm
37	LA-3518-C	JGR - 12	80	0	0
38			80	0	10
39			80	0	30
40			80	5	0
41			80	5	10
42			80	5	30
43	VX-12615		80	0	0
44			80	0	10
45			80	0	30
46			80	5	0
47			80	5	10
48			80	5	30
49	97-VD-129		80	0	0
50			80	0	10
51			80	0	30
52			80	5	0
53			80	5	10
54			80	5	30

Fuente: Autor

4.3 PROCESO DE RECOLECCIÓN, ORGANIZACIÓN, SISTEMATIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS DATOS

Los datos serán recolectados por experimentación en los laboratorios del INCITEMA mediante lectura directa utilizando un potencióstato-galvanostato y conectado a un computador.

Los datos de resultados obtenidos serán organizados en una hoja de Excel clasificados por muestra y por inhibidor (para cada valor de variable independiente del ensayo correspondiente) para su fácil utilización y el análisis de resultados de las técnicas mencionadas permitirá determinar la velocidad de corrosión del material e impedancia electroquímica.

Una vez se terminen las 54 pruebas se realizarán los análisis morfológicos superficiales por microscopía y se analizarán los resultados para determinar el comportamiento de las variables independientes en la velocidad de corrosión mediante gráficas.

5. METODOLOGIA Y RESULTADOS

5.1 METODOLOGÍA

5.1.1 Caracterización del material.

Para el desarrollo del proyecto, se utilizaron piezas mecanizadas de una sección de tubería identificada como acero API N80. Para garantizar que el material utilizado en las pruebas correspondía con acero API N80, se realizó la caracterización metalográfica, de resistencia mecánica, microdureza y composición química.

5.1.1.1 Caracterización metalográfica.

La caracterización microestructural se realizó siguiendo las recomendaciones de la norma ASTM E 339. Se utilizó una pulidora DACE TECHNOLOGIES NANO 200 DT, con velocidad de rotación variable (**Figura 33**) y se realizó el pulido del material desde grano 80 hasta 1200. Luego del desbaste y pulido con lija se realizó la preparación de la probeta con paños y adición de alúmina hasta obtener una superficie con acabado especular y libre de líneas de pulido.

Figura 33. Pulidora Dace Technologies NANO 200 DT.



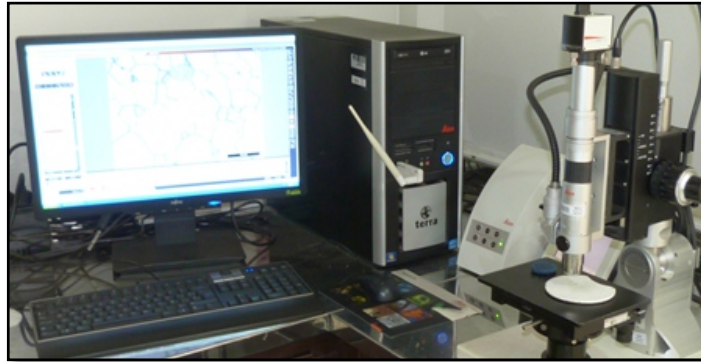
Fuente: Autor.

Luego del pulido la probeta se observó en microscopio CARL ZEISS (**Figura 34**) con objetivo de 100X para analizar las inclusiones presentes, según ASTM E 45⁴⁰.

³⁹ ASTM INTERNATIONAL. Standard guide for preparation of metallographic specimens. ASTM E 3 -11(2017).

⁴⁰ ASTM INTERNATIONAL. Standard test methods for determining the inclusion content of steel. ASTM E 45-18.

Figura 34. Microscopio óptico Carl Zeiss AxioTech.

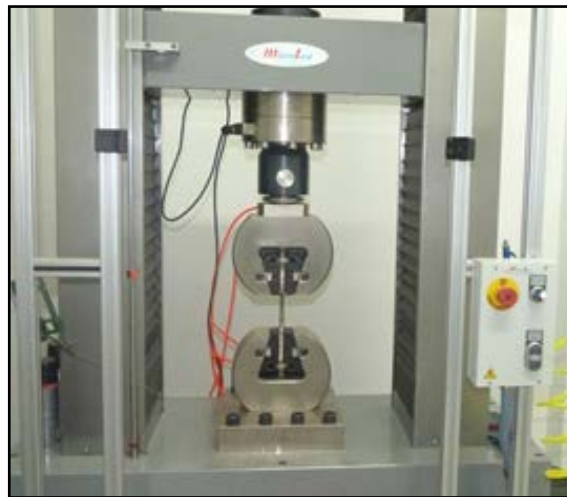


Fuente: Autor.

Al finalizar el análisis de inclusiones, la probeta fue atacada con *nital* (alcohol + ácido nítrico) al 3% durante 3 segundos, para ser analizada en microscopio óptico CARL ZEISS AXIOTECH con objetivos de 200X y 1000X para caracterizar la microestructura.

5.1.1.2 Determinación de resistencia mecánica. La resistencia mecánica se determinó siguiendo recomendaciones de ASTM E 841, usando una máquina universal de ensayos MICROTTEST (**Figura 35**). Donde se mecanizaron probetas planas con sección transversal conocida (**Figura 36**).

Figura 35. Máquina universal de ensayos Microtest.



Fuente: Autor.

⁴¹ ASTM INTERNATIONAL. Standard test methods for tension testing of metallic materials. ASTM E 8/E8M – 16a

Figura 36. Probetas para máquina de tracción.



Fuente: Autor.

5.1.1.3 Análisis de microdureza. La determinación de microdureza se realizó de acuerdo con ASTM E 38442. Se utilizó un microdurómetro digital MICROHARDNESS TESTER HSV-1000 (**Figura 37**). Se realizaron 5 indentaciones con carga de 9,8 N y separación de 1 mm entre ellas.

Figura 37. Microdurómetro digital HSV-1000.



Fuente: Autor.

5.1.1.4 Determinación de composición química. La composición química se determinó mediante espectrometría de emisión óptica con fuente de chispa, se siguieron lineamientos de ASTM E 41543. Se utilizó un espectrómetro Q8 MAGELLAN BRUKER QUANTRON presentado en la **Figura 38**.

⁴² ASTM INTERNATIONAL. Standard test method for microindentation hardness of materials. ASTM E 384-17.

⁴³ ASTM INTERNATIONAL. Standard Test Method for Optical Emission Vacuum Spectrometric Analysis of Carbon and Low-Alloy Steel. ASTM E 415-99a

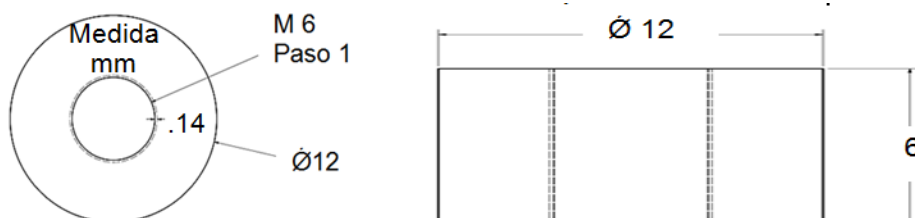
Figura 38. Espectrómetro Q8 Magellan.



Fuente: Autor.

5.1.2 Preparación de probetas. Se realizaron cincuenta y cuatro (54) probetas de acuerdo con el control paramétrico y combinación de las diferentes variables que se encuentran dentro del cronograma, las probetas corresponden al material empleado en campo en secciones de fondo de pozo API N 80. Como se observa en la **Figura 39**, con el material se maquinaron los electrodos cilíndricos de dimensiones de aproximadamente 11-12 mm de diámetro y espesor de 5.5-6.5 mm, la cual esta roscada internamente para producir continuidad con la parte interna de la probeta y el eje del reactor.

Figura 39. Diseño y medidas en mm de las probetas API N 80.



Fuente: Autor.

Dichos electrodos fueron desbastados con papel esmeril hasta grado 600. Para tal efecto se empleó un taladro de banco y se procedió a desbastar en una sola dirección, empleando lija numero 120 hasta llegar a lija número 600, lo cual garantiza una superficie limpia y homogénea con un grado de preparación superficial SSPC-SP 5/NACE NO. 1 (metal blanco)⁴⁴, según lo establecido en la norma ASTM G1-03⁴⁵, la **Figura 40**. Probetas a) electrodos maquinados, b)

⁴⁴SSPC-SP 5/NACE NO. 1, Joint Surface Preparation Standard, White Metal Blast Cleaning,

⁴⁵ASTM INTERNATIONAL. Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens. ASTM G1-03 (2017)e1.

electrodos pulidos hasta grado 600, muestra la forma de las probetas fabricadas respectivamente.

Figura 40. Preparación mecánica de las probetas.



Fuente: Autor.

5.1.2.1 Probetas electroquímicas. Deben tener un acabado en lija hasta No. 1200 y las probetas de gravimetría hasta No.600. Todas las probetas se dejan en desecador, hasta su requerimiento. Seguido a esto se procede a la limpieza de estas con solución de acetona para remover impurezas o suciedad y luego un posterior secado con aire frío para evitar que la probeta se queme. Las probetas son previamente pesadas y medidas para llevar un registro dentro del montaje para analizar los cambios que suceden en cada uno de las pruebas.

5.1.3 Diseño experimental. Se estudia el efecto de la variación de la temperatura, la presión y la velocidad de flujo sobre la eficiencia del inhibidor de corrosión en probetas de acero API N80, manteniéndolas en ambientes totalmente acuosos ricos en O₂. El diseño experimental está descrito en detalle ...en el numeral 4.2... del capítulo anterior.

5.1.4 Procedimiento para realizar una prueba. Las unidades experimentales son piezas de acero tipo API N80 cilíndricas, descritas anteriormente, que son sometidas a tratamiento con cada nivel de variable mostrado en ...la **Tabla 7** del capítulo 4..., se realizan pruebas hasta completar el control paramétrico, teniendo en cuenta los niveles escogidos. Los fluidos industriales, a la cual se adiciona el producto (Inhibidor de corrosión) de acuerdo a las dosificaciones establecidas (10 y 30 ppm).

Se realizaron pruebas electroquímicas luego de 24 horas de reposo para las soluciones dosificadas. Para la evaluación mediante técnicas electroquímicas se utilizó un electrodo de anillo rotatorio, acoplado a un potencióstato-galvanostato, como se muestra en la **Figura 41**.

Figura 41. Electrodo de anillo rotatorio.



Fuente: Autor.

El potencial de corrosión entre el electrodo de trabajo y el electrodo de referencia (plata/cloruro de plata) fue estabilizado durante 1 hora, posteriormente se dejó un tiempo de 4 horas, para que el inhibidor pueda actuar y se genere la inhibición la película fílmica en la superficie disminuyendo el deterioro que le ocasiona el fluido industrial, luego de éste periodo se desarrollaron las pruebas electroquímicas. El análisis de resultados de las técnicas electroquímicas mencionadas permitió determinar la velocidad de corrosión del material.

Luego de realizar pruebas electroquímicas, Se determina la velocidad de corrosión para cada uno de los fluidos industriales, tomando como referencia una muestra sin presencia de inhibidor (blanco), para obtener la eficiencia de inhibición según lo establece la norma ASTM G 170, ecuación 1:

$$\text{Eficiencia de Inhibición (\%)} = \left(1 - \frac{\text{Vel. Corrosión sin inhibidor}}{\text{Vel. Corrosión con inhibidor}}\right) \times 100 \quad (1)$$

5.2 RESULTADOS

5.2.1 Caracterización del material. Para identificar la composición química del material que se quiere evaluar, se desarrollaron los siguientes análisis:

5.2.1.1 Composición química. En el espectrómetro de emisión de chispa se analiza la composición de material, los valores del resultado obtenidos son comparados con los determinados por la norma API SPC 5CT, Specification for Casing and Tubing, para el acero N-80. En la **Tabla 9**, se muestra el resultado del análisis por espectrómetro de chispa.

Tabla 9. Análisis de composición por espectrómetro de chispa

Composición Química			
Elemento	%	Elemento	%
C	0,322	P	0,00803
Co	<0,01	S	0,00795
Cr	0,0358	Si	0,205
Cu	0,00686	Sn	0,00414
Fe	98,1	Ti	<0,005
Mn	1,18	V	<0,0050

Fuente: Autor.

De acuerdo con la especificación de la norma, se comprueba que el material analizado cumple con las especificaciones para el tipo de acero analizado.

Según la norma API SPC 5CT, denominada Specification for Casing and Tubing, nos muestra en su tabla E.5 — Chemical composition, mass fraction (%) una relación para la composición que debe tener las tuberías N-80, como se presenta a continuación en la **Tabla 10**. Según es la norma, después de realizado el análisis de composición química, se determinó que el acero, con el cual se contaba cumplía con las especificaciones.

Tabla 10. Composición química aceros. Norma API SPC 5CT.

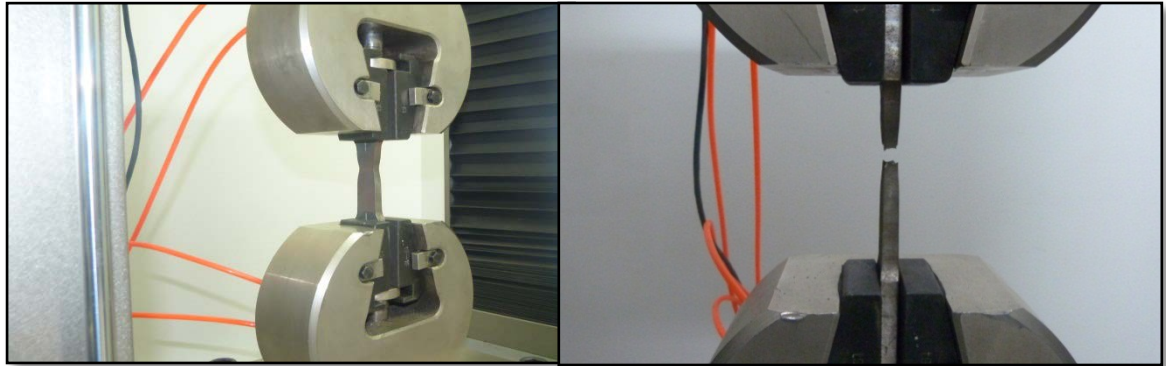
Group	Grade	Type	C		Mn		Mo		Cr		Ni	Cu	P	S	Si
			min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	max.	max.	max.	max.	max.
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	H40	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.030	0.030	—
	J55	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.030	0.030	—
	K55	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.030	0.030	—
	N80	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.030	0.030	—
	N80	Q	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.030	0.030	—

Fuente: Norma API Spec 5CT, tabla E.5.

5.2.1.2 Ensayo de tracción. Según la norma API Spec 5CT, Specification for Casing and Tubing, los valores para la tracción toma valores de superiores a 80.000 psi.

A continuación se relacionan las evidencias de la realización del ensayo de tracción siguiendo los lineamientos de la norma ASTM E 08. La **Figura 42**, muestra el montaje y el momento en que la probeta falla a una carga aproximadamente de 105.485 KN.

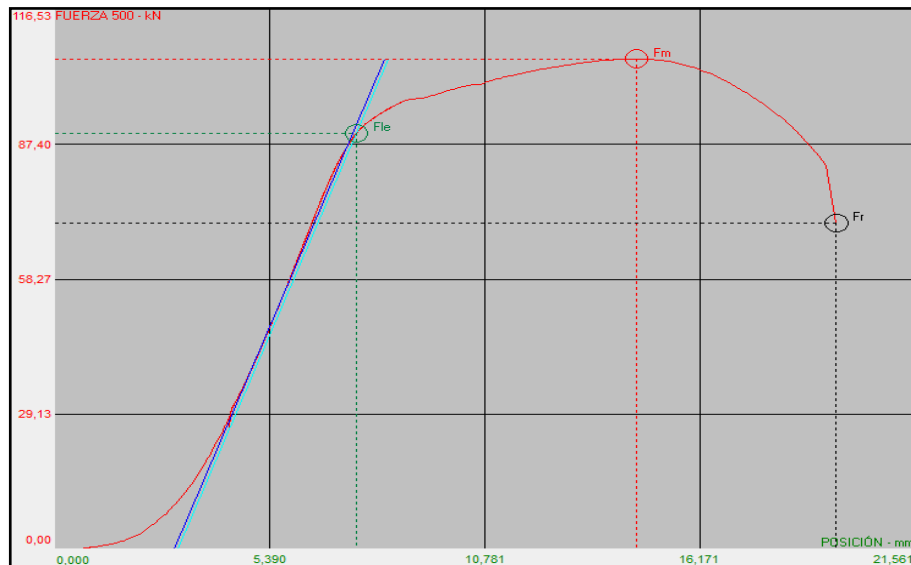
Figura 42. Ensayo de tracción probetas N-80.



Fuente: Autor.

La **Figura 43**, muestra los valores obtenidos en el ensayo de tracción, en una curva de esfuerzo va deformación, donde se toma el esfuerzo y dividirlo por el área para así hallar la resistencia que puede soportar el material.

Figura 43. Esfuerzo vs Deformación de probeta acero API N-80.



Fuente: Autor.

Despues de realizada la curva, se desarrollan los siguientes calculos para obtener el valor de resistencia a la traccion en base a la ecuación (14):

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad Ec (14)$$

σ : Resistencia a la traccion

P : Valor de la carga (lb)

A : Area de la probeta (in²)

Los datos de las dimensiones expuestas dan como resultado un area expuesta al ensayo de traccion(A) y una carga (P). Los valores obtendinos son reemplazados en la ecuacion (14), dando como resultado en la ecuacion (14b) el valor de resistencia a la traccion para el acero API N-80.

$$\begin{aligned}
 A &= 6.9mm \times 20.8mm = 143.52 * mm^2 = 0.222in^2 \\
 P &= 105845 N \\
 1kg &= 9,8N = 2,2Lb \\
 P &= \frac{105485 N \times 2,2Lb}{9,8N} = 23680,30 Lb \quad Ec (14a) \\
 \sigma &= \frac{P}{A} = \frac{23680,30 Lb}{0.222 in^2} = 106668,04 \frac{Lb}{in^2} \quad Ec (14b)
 \end{aligned}$$

Se determinó que el acero cumple con las especificaciones de la resistencia a la tracción, ya que según la norma API SPC 5, la resistencia de un acero API N-80 es mayor o igual a 80000 psi, comparada con el resultado del ensayo que dio 106668,04 psi.

5.2.1.3 Microdurómetro. Según la norma ASTM E 384, Se registran los valores de dureza como un promedio 241.1 Vickers, este valor se compara con la norma API SPC 5 y se determina que está dentro de las especificaciones requeridas por esta. Los valores obtenidos se relacionan en la **Tabla 11**, muestra los valores obtenidos en la prueba.

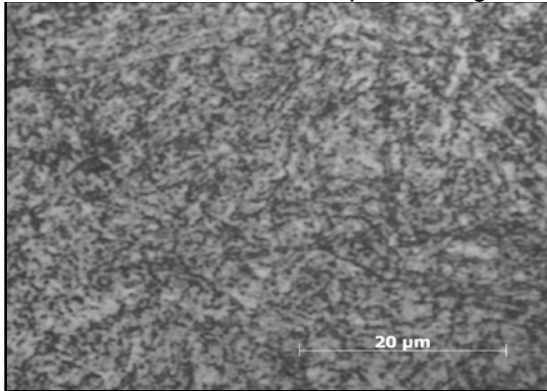
Tabla 11. Prueba de dureza acero API N-80.

Prueba	1	2	3	4	5
Valor obtenido(HV)	243.3	242.3	240.2	238.6	239,4

Fuente: Autor.

5.2.1.4 Microestructura. Se realiza una comparación de la estructura identificada por el microscopio metalográfico la cual se encuentra en la **Figura 44**, y la estructura que se muestra en la norma API SPC 5CT, denominada Specification for Casing and Tubing, se verifica que la estructura es totalmente bainitica característica de este tipo de acero, con el tipo de tratamiento térmico que recibe.

Figura 44. Microestructura de un acero N-80. Microscopio metalográfico, 500x.

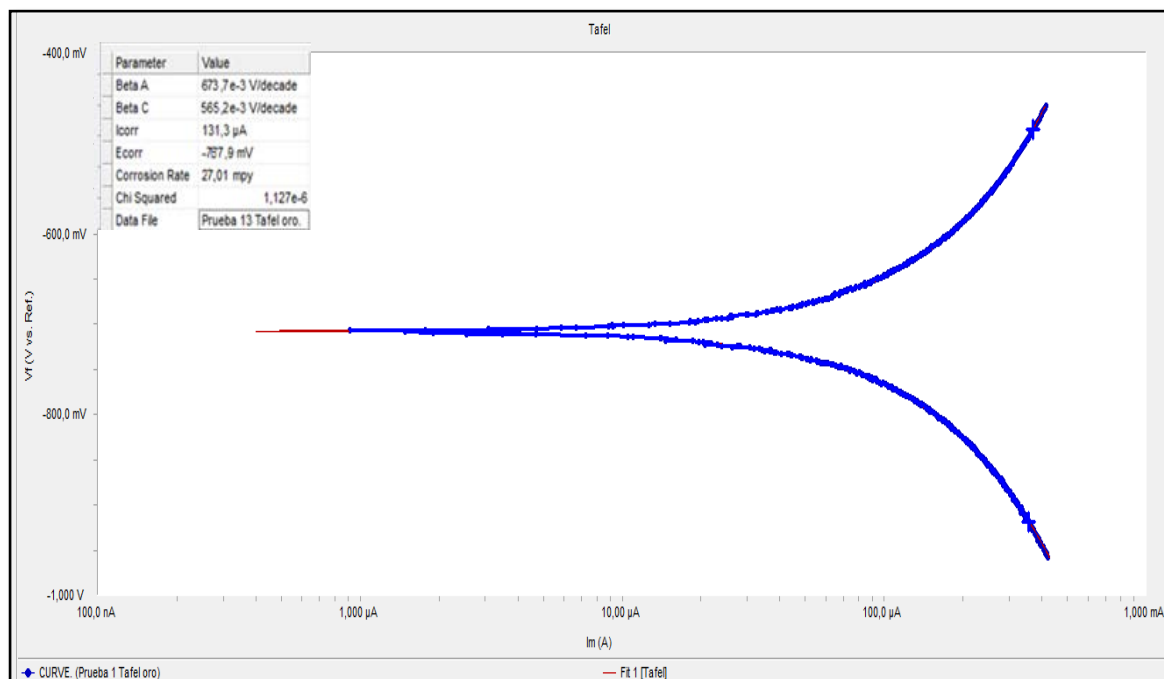


Fuente: Autor.

5.2.2 Técnicas electroquímicas para determinar la eficiencia de inhibición. A continuación se relaciona y analizan los resultados obtenidos en cada una de las técnicas electroquímicas empleadas en la evaluación del inhibidor:

5.2.2.1 Construcción de curvas de polarización Tafel. En el software GAMRY FRAMEWORK, se introducen datos de entrada como densidad del material, área expuesta de la probeta, se conecta el programa por medio de conexiones y se construye la gráfica con base en los impulsos de la señal transmitida por el montaje como se observa en la **Figura 45**.

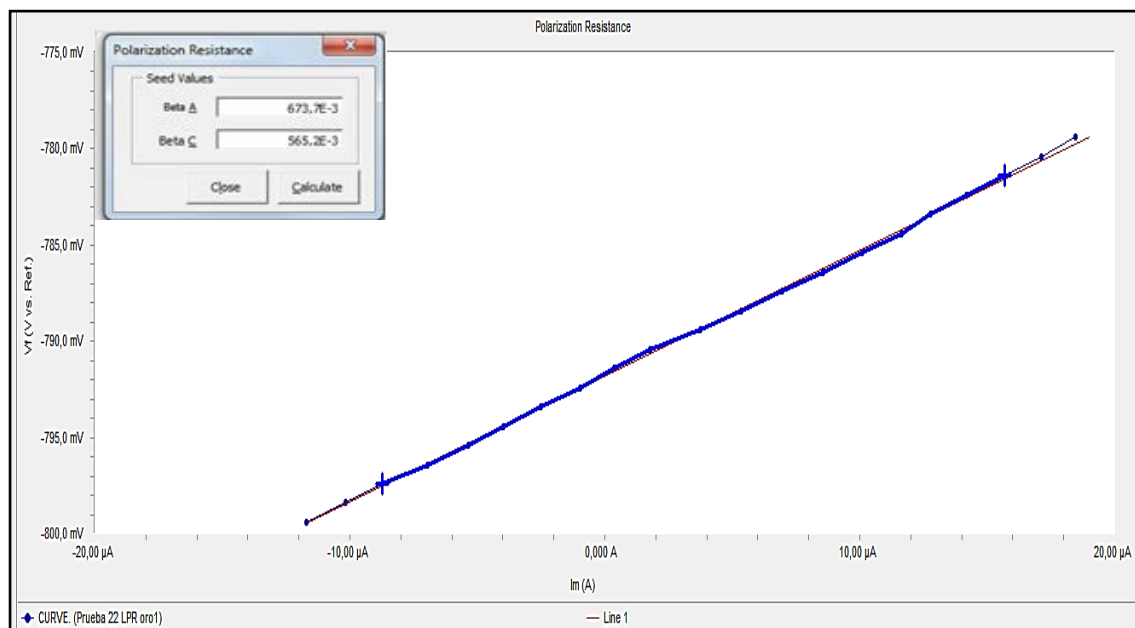
Figura 45. Construcción y análisis de curvas de polarización Tafel.



Fuente: Autor.

5.2.2.2 Construcción de curvas de resistencia a la polarización lineal. El análisis de las curvas LPR dentro del software incluye la rectificación de la curva, luego con base en la curva Tafel, son requeridos por el software los valores de β_a y β_c como se observa en la **Figura 46**, con los valores introducidos el programa determina el valor de la corrosión obtenida por la gráfica resultante en cada una de las diferentes pruebas. La técnica consiste en realizar un barrido desde el potencial de corrosión indicado, con un rango de -25mV y +25mV y una velocidad de barrido de 0,1m/s como se detalló en el marco teórico...del capítulo 2....

Figura 46. Construcción y análisis de la curva LPR



Fuente: Autor.

5.2.3 Resultados de velocidad de corrosión. Después de realizadas las pruebas se obtuvieron los resultados que se muestran en la **Tabla 12**. Corresponde a las pruebas LPR y Tafel donde se muestran las velocidades de corrosión de las pruebas que no contienen inhibidor de corrosión (blanco), y las que se obtienen con 10 y 30 ppm de dosificación en un ambiente rico en oxígeno, para luego de obtenerlas compararla con la eficiencia de inhibición.

Se observa que las velocidades de corrosión de los blancos son muy altas superiores a 20 mpy y disminuyen cuando se dosifica el inhibidor a velocidades por debajo de 8 mpy. Las velocidades de corrosión más bajas se obtuvieron con el inhibidor LA-3518-C para la muestra de las aguas de inyección del pozo JGR-12.

Para cada una de la pruebas, se tuvo en cuenta el blanco para determinar la eficiencia de inhibición, debido que se relaciona las pruebas que se realizaron a las mismas condiciones con inhibidor y pruebas que se ejecutaron a las mismas variables sin inhibidor, para dar un total de 54 pruebas cuyos resultados se muestran en la **Tabla 13**.

Tabla 12. Resultado de las velocidades de corrosión por Tafel y LPR.

	N°	INHIBIDORES	MUESTRAS DE FLUIDOS	TEMPERATURA (°C)	OXIGENO (ppm)	DOSIFICACIONES (ppm)	IMPEDANCIA (Ohm)	CR (mpy)
1	7	LA-3518-C	CCS-12	80	0	0	120,1	25,65
2	8			80	0	10	442	6,96
3	9			80	0	30	449,6	6,85
4	10			80	5	0	108	28,35
5	11			80	5	10	351,6	8,7
6	12			80	5	30	366,4	8,35
7	19	VX-12615		80	0	0	120,1	25,65
8	20			80	0	10	380,7	8,09
9	21			80	0	30	402,3	7,65
10	22			80	5	0	108	28,35
11	23			80	5	10	310,9	9,84
12	24			80	5	30	329,8	9,28
13	31	97-VD-129		80	0	0	120,1	25,65
14	32			80	0	10	445,1	6,92
15	33			80	0	30	534,3	5,76
16	34			80	5	0	108	28,35
17	35			80	5	10	343	8,92
18	36			80	5	30	361,3	8,47
19	41	LA-3518-C	TRS-N2	80	0	0	126,6	23,16
20	42			80	0	10	599,4	4,89
21	43			80	0	30	686,6	4,27
22	44			80	5	0	107	27,35
23	45			80	5	10	404,1	7,24
24	46			80	5	30	442,9	6,6
25	47	VX-12615		80	0	0	126,6	23,16
26	48			80	0	10	457,4	6,41
27	55			80	0	30	489,1	5,98
28	56			80	5	0	107	27,35
29	57			80	5	10	336,4	8,7
30	58			80	5	30	350,5	8,35
31	59	97-VD-129		80	0	0	126,6	23,16
32	60			80	0	10	478,3	6,13
33	67			80	0	30	546,9	5,36
34	68			80	5	0	107	27,35
35	69			80	5	10	362,1	8,08
36	70			80	5	30	384,2	7,61
37	71	LA-3518-C	JGR - 12	80	0	0	132,5	20,65
38	72			80	0	10	992,5	2,75
39	79			80	0	30	1231,4	2,22
40	80			80	5	0	126,1	24,68
41	81			80	5	10	637,8	4,87
42	82			80	5	30	697,8	4,46
43	83	VX-12615		80	0	0	132,5	20,65
44	84			80	0	10	581,9	4,7
45	90			80	0	30	648,9	4,21
46	91			80	5	0	126,1	24,68
47	92			80	5	10	429,6	7,24
48	93			80	5	30	458,6	6,78
49	94	97-VD-129		80	0	0	132,5	20,65
50	95			80	0	10	742,7	3,68
51	96			80	0	30	836,5	3,16
52	103			80	5	0	126,1	24,68
53	104			80	5	10	530,9	5,86
54	105			80	5	30	538,3	5,33

Fuente: Autor.

Tabla 13. Resultado de las pruebas con inhibidor y determinación de eficiencia de inhibición.

	N°	INHIBIDORES	MUESTRAS DE FLUIDOS	TEMPERATURA (°C)	OXIGENO (ppm)	DOSIFICACIONES (ppm)	EFICIENCIA (%)
1	7	LA-3518-C	CCS-12	80	0	0	0
2	8			80	0	10	72,83
3	9			80	0	30	73,29
4	10			80	5	0	0
5	11			80	5	10	69,31
6	12			80	5	30	70,52
7	19	VX-12615		80	0	0	0
8	20			80	0	10	68,45
9	21			80	0	30	70,15
10	22			80	5	0	0
11	23			80	5	10	65,26
12	24			80	5	30	67,25
13	31	97-VD-129		80	0	0	0
14	32			80	0	10	73,02
15	33			80	0	30	77,52
16	34			80	5	0	0
17	35			80	5	10	68,51
18	36			80	5	30	70,11
19	41	LA-3518-C	TRS-N2	80	0	0	0
20	42			80	0	10	78,88
21	43			80	0	30	81,56
22	44			80	5	0	0
23	45			80	5	10	73,52
24	46			80	5	30	75,84
25	47	VX-12615		80	0	0	0
26	48			80	0	10	72,32
27	55			80	0	30	74,16
28	56			80	5	0	0
29	57			80	5	10	68,19
30	58			80	5	30	69,45
31	59	97-VD-129		80	0	0	0
32	60			80	0	10	73,53
33	67			80	0	30	76,85
34	68			80	5	0	0
35	69			80	5	10	70,45
36	70			80	5	30	72,15
37	71	LA-3518-C	JGR - 12	80	0	0	0
38	72			80	0	10	86,65
39	79			80	0	30	89,24
40	80			80	5	0	0
41	81			80	5	10	80,23
42	82			80	5	30	81,91
43	83	VX-12615		80	0	0	0
44	84			80	0	10	77,23
45	90			80	0	30	79,58
46	91			80	5	0	0
47	92			80	5	10	70,65
48	93			80	5	30	72,50
49	94	97-VD-129		80	0	0	0
50	95			80	0	10	82,16
51	96			80	0	30	84,65
52	103			80	5	0	0
53	104			80	5	10	76,25
54	105			80	5	30	78,38

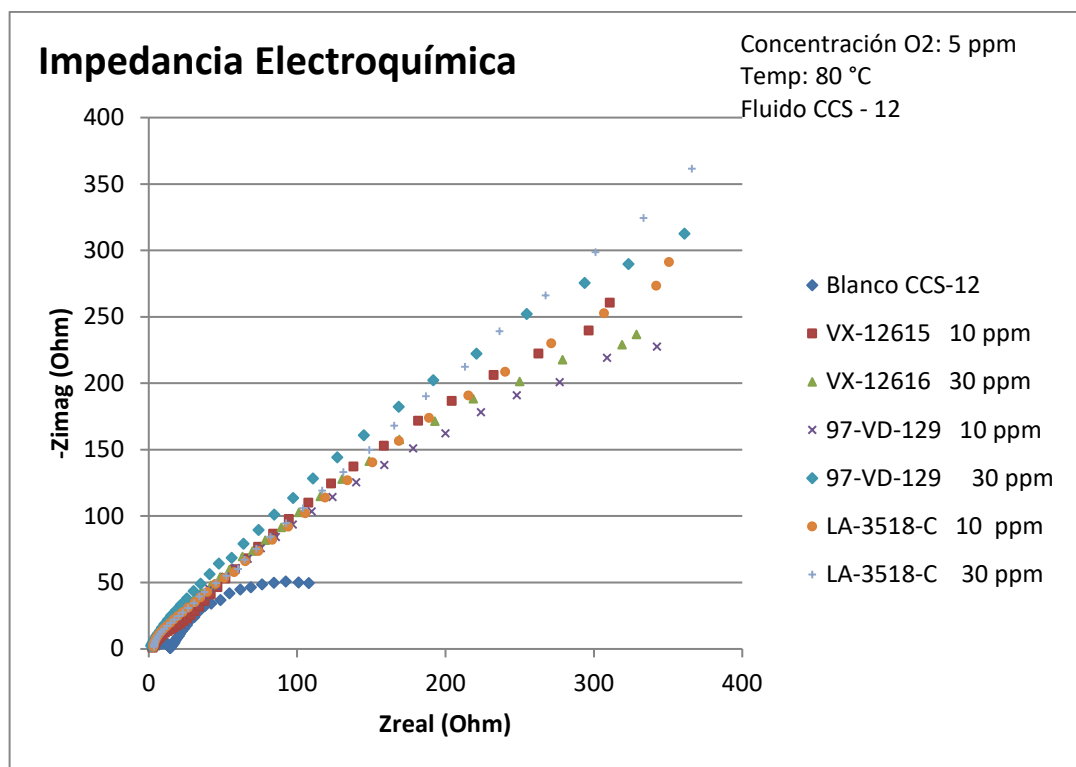
Fuente: Autor.

5.2.4 Espectroscopía de impedancia electroquímica. En la **Figura 47**, **Figura 48** y **Figura 49**, se pueden observar los diagramas de impedancia electroquímica para las diferentes evaluaciones realizadas.

Los aspectos relevantes que se pueden observar de son los siguientes:

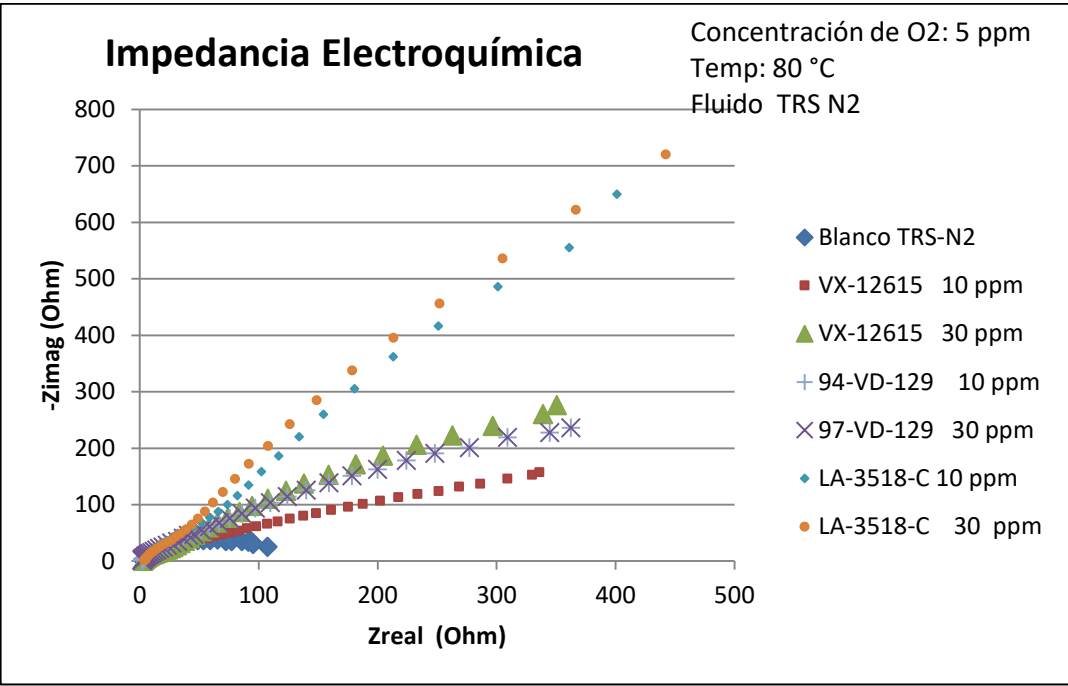
- Se observa de manera clara que la probeta sin adición de inhibidor para cada uno de los fluidos muestreados presenta una impedancia de interfase muy pequeña y además es fácilmente identificable la resistencia a la polarización por extrapolación del círculo de Nyquist.
- Se observa de manera clara que la adición de inhibidor cambia las características del círculo y se obtienen mejores respuestas con 30 ppm que con 10 ppm de concentración de oxígeno.
- Los resultados obtenidos son muy similares a los que arroja la resistencia a la polarización lineal.

Figura 47. Espectroscopia de impedancia electroquímica. Fluido CCS-12, Temperatura 80 °C, Concentración de O₂ de 5 ppm.



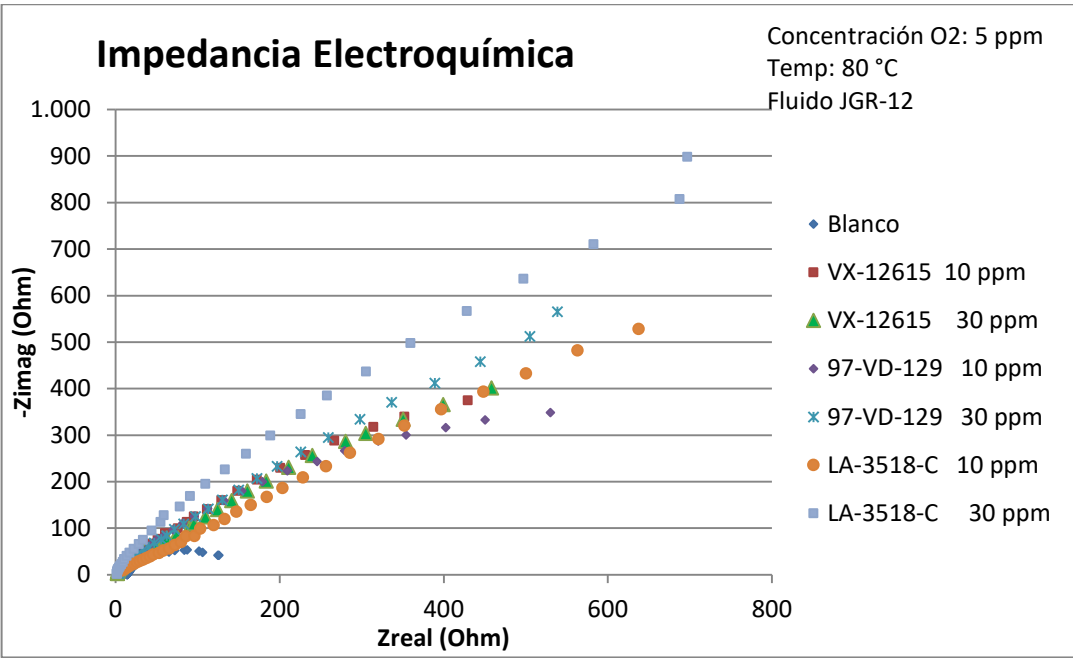
Fuente: Autor.

Figura 48. Espectroscopia de impedancia electroquímica. Fluido TRS-N2, Temperatura 80 °C, Concentración de O2 de 5 ppm.



Fuente: Autor.

Figura 49. Espectroscopia de impedancia electroquímica. Fluido JGR-12, Temperatura 80 °C, Concentración de O2 de 5 ppm.



Fuente: Autor.

En la **Tabla 14**, **Tabla 15** y **Tabla 16** a continuación, se pueden observar los valores extrapolados obtenidos con la técnica de EIS para las diferentes pruebas realizadas de los tres tipos de fluidos muestreados. En este caso se escoge las condiciones más agresivas para y con las cuales se determina la eficiencia de inhibición para cada inhibidor y su comportamiento.

Tabla 14. Determinación de eficiencia de inhibición en el fluido CCS-A12.

INHIBIDORES	MUESTRAS DE FLUIDOS	TEMPERATURA (°C)	OXIGENO (ppm)	DOSIFICACIONES (ppm)	IMPEDANCIA (Ohm)	EFICIENCIA (%)
Blanco	CCS-A12	80	5	0	108,0	0
LA-3518-C		80	5	10	351,9	69,31
LA-3518-C		80	5	30	366,4	70,52
VX-12615		80	5	10	310,9	65,26
VX-12615		80	5	30	329,8	67,25
97-VD-129		80	5	10	343,0	68,51
97-VD-129		80	5	30	361,3	70,11

Fuente: Autor.

Tabla 15. Determinación de eficiencia de inhibición en el fluido TRS-12.

INHIBIDORES	MUESTRAS DE FLUIDOS	TEMPERATURA (°C)	OXIGENO (ppm)	DOSIFICACIONES (ppm)	IMPEDANCIA (Ohm)	EFICIENCIA (%)
Blanco	TRS-N2	80	5	0	107,0	0
LA-3518-C		80	5	10	404,1	73,52
LA-3518-C		80	5	30	442,9	75,84
VX-12615		80	5	10	336,4	68,19
VX-12615		80	5	30	350,5	69,45
97-VD-129		80	5	10	362,1	70,45
97-VD-129		80	5	30	384,2	72,15

Fuente: Autor.

Tabla 16. Determinación de eficiencia de inhibición en el fluido JGR-12.

INHIBIDORES	MUESTRAS DE FLUIDOS	TEMPERATURA (°C)	OXIGENO (ppm)	DOSIFICACIONES (ppm)	IMPEDANCIA (Ohm)	EFICIENCIA (%)
Blanco	JGR - 12	80	5	0	126,1	0
LA-3518-C		80	5	10	637,8	80,23
LA-3518-C		80	5	30	697,8	81,91
VX-12615		80	5	10	429,6	70,65
VX-12615		80	5	30	458,6	72,50
97-VD-129		80	5	10	530,9	76,25
97-VD-129		80	5	30	538,3	78,38

Fuente: Autor.

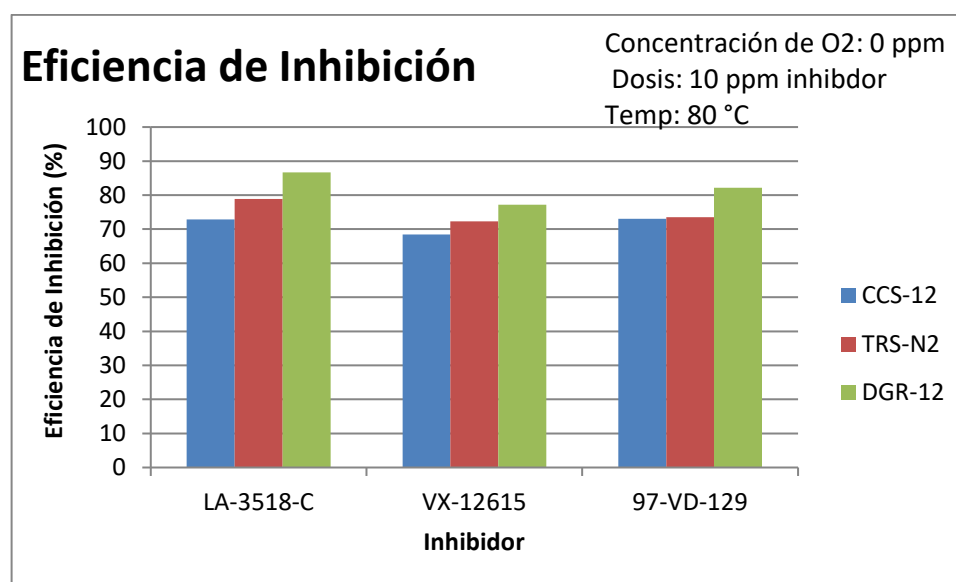
Es concluyente de este trabajo, que la técnica de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIS), es además una técnica confiable para evaluar eficiencia de inhibidores y puede ser utilizada para determinar el efecto de la concentración y parámetros operacionales.

5.2.5 Análisis gráfico de los resultados obtenidos. Los resultados obtenidos de eficiencias de inhibición se graficaron para LPR y Tafel y para EIS, a continuación se describen los resultados obtenidos.

5.2.5.1 Eficiencias de inhibición a partir de Tafel y LPR. Los resultados evidencian que para el inhibidor VX-12615, la eficiencia de inhibición se encuentra en valores cercanos al 70% de protección, lo cual establece que a estas condiciones la transferencia de carga está presente como para que el inhibidor contrarreste totalmente los mecanismos de daño en concentración nulos de oxígeno, el estudio también determina que el electrolito CCS-A12 contiene parámetros fisicoquímicos más agresivos que los demás, permitiendo un deterioro mayor en la superficie de la probeta.

Se realiza el análisis de la variable respuesta (eficiencia de inhibición) en cada uno de los inhibidores, los cuales fueron dosificados en fluidos de inyección, como se presenta en la **Figura 50**.

Figura 50. Eficiencia de inhibición para una dosificación de 10 ppm de inhibidor, 0 ppm de Oxígeno y temperatura de 80 °C.



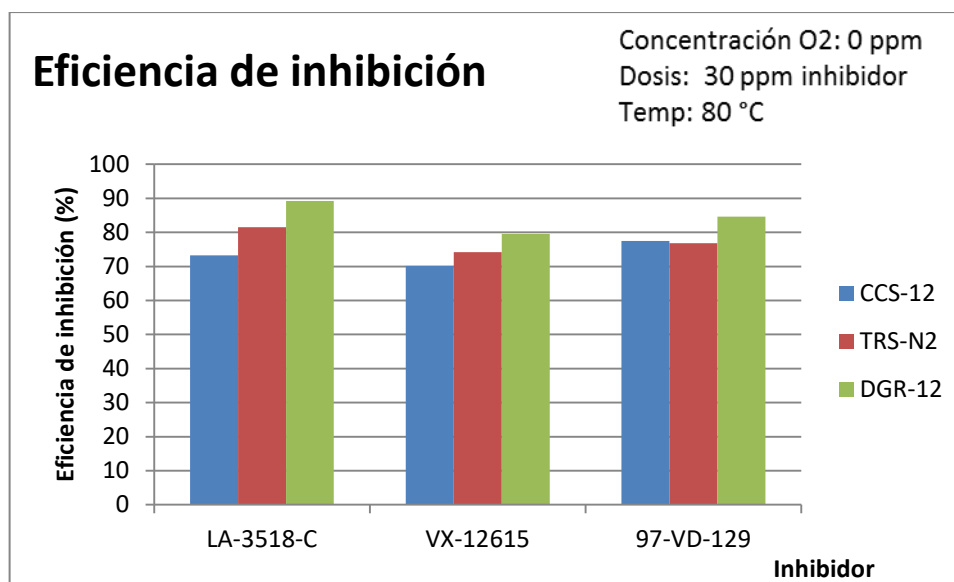
Fuente: Autor.

Se observa que la eficiencia de inhibición está influenciada directamente por la dosificación; el comportamiento es creciente al aumentar la concentración del

inhibidor, se observa que al mantener una temperatura de 80°C, presenta una tendencia protectora mayor, a diferencia cuando se tiene una dosificación 10 ppm de inhibidor.

Como se evidencia en la **Figura 51**, el inhibidor LA-3518-C, presenta un comportamiento más favorable para contrarrestar mecanismos de corrosión, seguido por el inhibidor 97-VD-129 y por último el inhibidor VX-12615, en el cual se observa una disminución de su característica protectora con respecto a los demás inhibidores evaluados, en este caso el fluido de producción CCS-12 continua siendo el electrolito que causa un deterioro mayor.

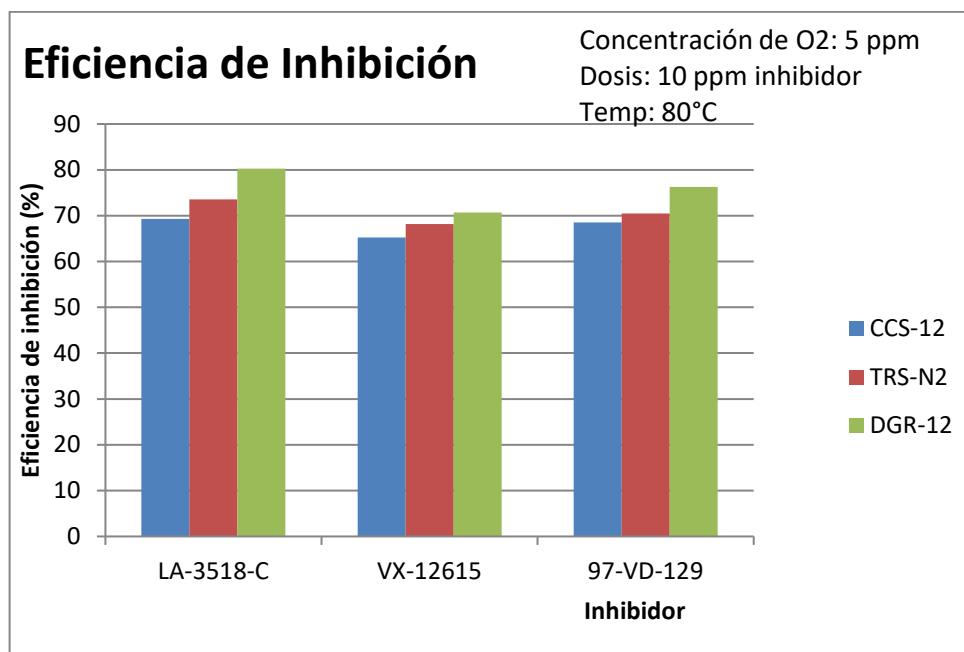
Figura 51. Eficiencia de inhibición para una dosificación de 30 ppm de inhibidor, 0 ppm de Oxígeno y temperatura de 80 °C.



Fuente: Autor.

Se observa en la **Figura 52**, el comportamiento de menor característica protectora debido a que son las condiciones que menos favorecen el comportamiento idóneo del inhibidor, con presencia de oxígeno y con una dosificación de inhibidor mínima, ya que evidencia que no supera porcentajes de eficiencia de 80 %, lo cual establece que el inhibidor tiene un desempeño débil cuando se encuentra en presencia de oxígeno. También se evidencia que el fluido JGR-12, contiene fisicoquímicos que favorecen al buen comportamiento del inhibidor.

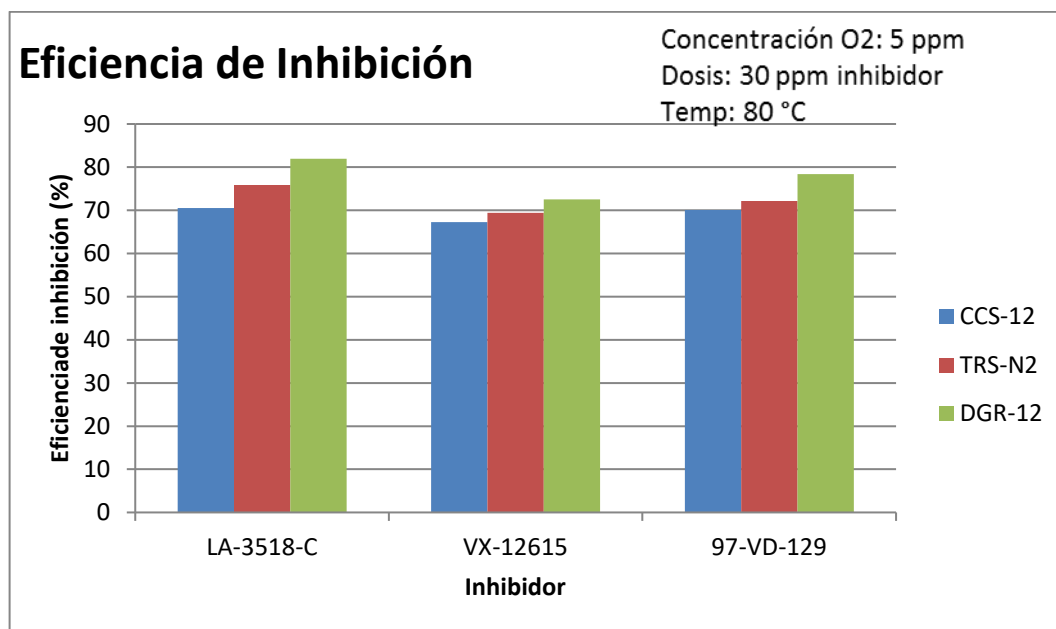
Figura 52. Eficiencia de inhibición para una dosificación de 10 ppm de inhibidor, 5 ppm de Oxígeno y temperatura de 80 °C.



Fuente: Autor.

Se evidencia en la **Figura 53** que la temperatura de 80°C, con concentración de oxígeno de 5 ppm presentan una disminución en la eficiencia de la inhibición, generando mecanismos que no permiten que el inhibidor tenga un comportamiento protector en niveles que favorezcan la preservación de la probeta metálica, sin embargo se observa que al aumentar la dosificación del inhibidor genera un incremento en la eficiencia, estableciendo que para condiciones críticas se podría elevar la concentración de inhibidor permitiendo cubrir un área mayor de la superficie sin que se degrade.

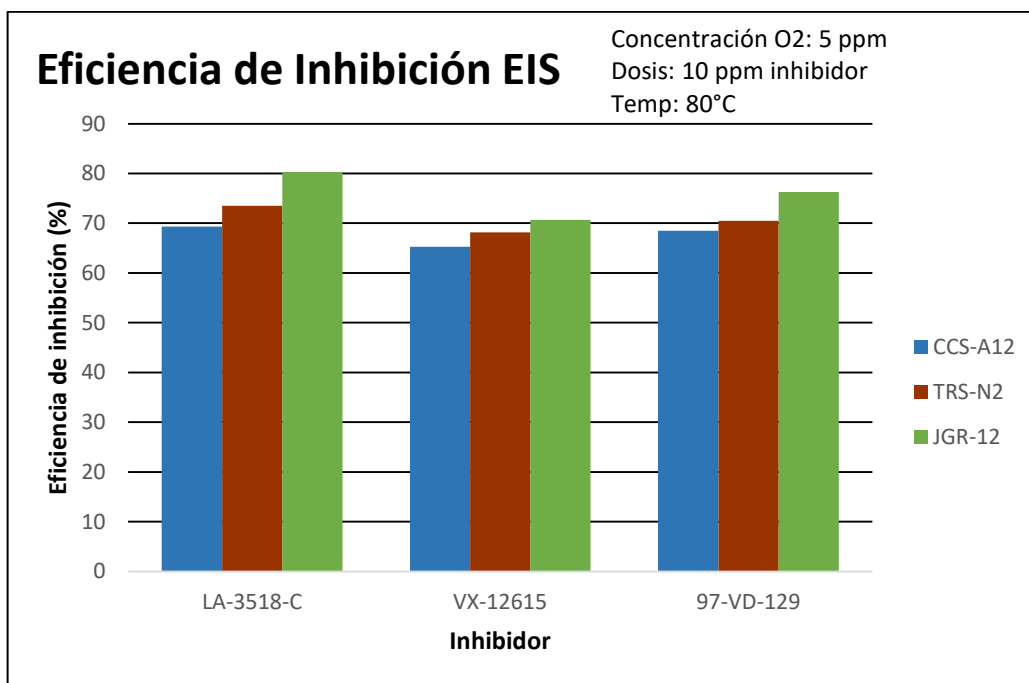
Figura 53. Eficiencia de inhibición para una dosificación de 30 ppm de inhibidor, 5 ppm de Oxígeno y temperatura de 80 °C.



Fuente: Autor.

5.2.5.2 Eficiencias de inhibición a partir de EIS. Los resultados de eficiencias de inhibición son muy similares a los obtenidos a partir de Tafel y LPR descritos en el ...numeral anterior.... La **Figura 54** muestra eficiencias de inhibición promedio de 70% influenciada por la alta temperatura de la prueba y se observa que el fluido del pozo JGR-12 presenta mayores eficiencias que el resto de fluidos.

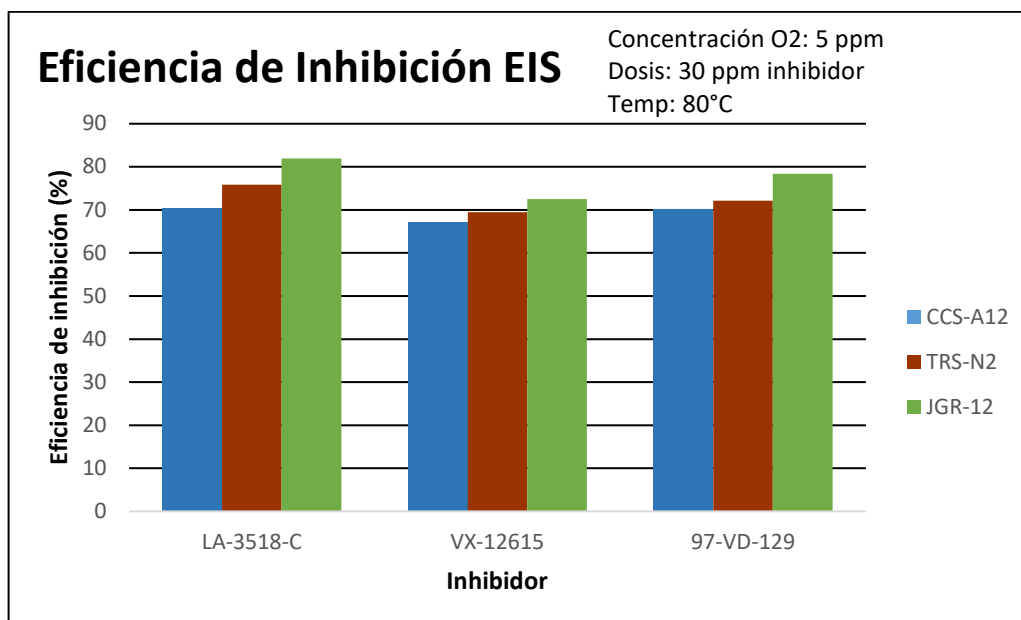
Figura 54. Eficiencia de inhibición EIS para una dosificación de 10 ppm de inhibidor, 5 ppm de Oxígeno y temperatura de 80 °C.



Fuente: Autor.

En la **Figura 55** de igual forma se observa un comportamiento similar al presentado a partir de Tafel y LPR, donde al aumentar la concentración de inhibidor a 30 ppm mejora la eficiencia de inhibición pese las condiciones de temperatura crítica de 80°C.

Figura 55. Eficiencia de inhibición EIS para una dosificación de 10 ppm de inhibidor, 5 ppm de Oxígeno y temperatura de 80 °C.



Fuente: Autor.

5.2.6 Apariencia superficial de las probetas. A continuación en la **Tabla 17** se presenta la apariencia superficial de la probetas que se usaron para las pruebas en condición (80 °C, 0 y 5 ppm de O₂, 0, 10 y 30 ppm de inhibidor), para cada una de las dosificaciones de inhibidor y concentración de oxígeno, siendo el inhibidor evaluado en este caso (LA-3518-C), se evidencia que la presencia de oxígeno permite obtener un morfología característica de este tipo de corrosión generando color rojizo.





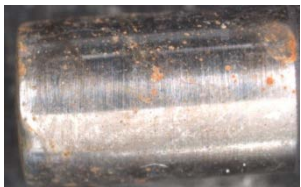
Tabla 17. Apariencia superficial probetas con inhibidor LA-3518-C.

APARIENCIA SUPERFICIAL INHIBIDOR LA-3518-C			
CONCETRACIÓN DE OXIGENO	0 ppm	10 ppm	30 ppm
0 ppm			
5 ppm			

Fuente: Autor.

Se presenta en la **Tabla 18** la apariencia superficial de las probetas que se usaron para las pruebas en condición (80 °C, 0 y 5 ppm de O₂, 0, 10 y 30 ppm de inhibidor), para cada una de las dosificaciones de inhibidor y concentración de oxígeno, siendo el inhibidor evaluado en este caso (VX-12615).



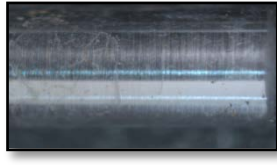
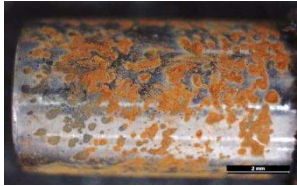
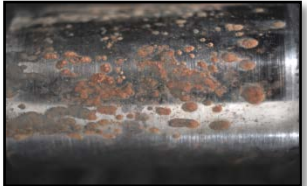
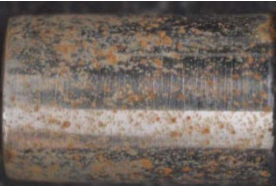
Tabla 18. Apariencia superficial probetas con Inhibidor VX-12615.

APARIENCIA SUPERFICIAL INHIBIDOR VX-12615			
CONCETRACIÓN DE OXIGENO	0 ppm	10 ppm	30 ppm
0 ppm			
5 ppm			

Fuente: Autor.

La apariencia superficial en la **Tabla 19**, mostrándose las probetas que usaron para las pruebas en condición (80 °C, 0 y 5 ppm de O₂, 0, 10 y 30 ppm de inhibidor), para cada una de las dosificaciones de inhibidor y concentración de oxígeno, siendo el inhibidor evaluado en este caso (97-VD-129).

Tabla 19. Apariencia superficial Inhibidor 97-VD-129.

APARIENCIA SUPERFICIAL INHIBIDOR 97-VD-129			
CONCETRACIÓN DE OXIGENO	0 ppm	10 ppm	30 ppm
0 ppm			
5 ppm			

Fuente: Autor.

6. CONCLUSIONES

Se lograron simular condiciones extremas de temperatura y concentración de oxígeno (80°C y 5 ppm de O₂) de los fluidos de muestra sobre un acero APIN80 típico de los pozos de inyección de agua en las operaciones del Bloque Caracara y se determinó que pese a dichas condiciones el efecto de los 3 inhibidores evaluados alcanza eficiencias de inhibición promedio del 70% lo cual es un gran aporte para frenar los mecanismos de corrosión interna aunque no por completo.

La alta temperatura del fluido va en detrimento de la efectividad de los inhibidores de corrosión, sin embargo a una temperatura extrema de 80°C aún tienen transferencia de carga suficiente para frenar la corrosión sobre la superficie de las probetas.

Se comprueba que el efecto de los inhibidores de corrosión en un ambiente muy rico en oxígeno disminuye su eficiencia con respecto a un ambiente sin oxígeno. Al aumentar la concentración del inhibidor se logra disminuir la velocidad de corrosión efecto que en el examen visual es evidente pero no por completo.

Las condiciones de concentración de oxígeno que se tienen normalmente en los pozos de inyección de agua nos son tan extremas y están en el orden de 20 a 70 ppb lo que permite tener velocidades de corrosión menores a las evaluadas y por ende el comportamiento de los 3 inhibidores se espera tenga eficiencias de inhibición mayores a las del presente trabajo.

Dado el alto costo que tienen los secuestrantes de oxígeno, es factible utilizar en cambio inhibidores de corrosión para frenar las velocidades de corrosión en ambientes ricos en oxígeno disuelto en sistemas de inyección de agua.

Los resultados de calcular la eficiencia de inhibición a partir de las velocidades de corrosión por Tafel y LPR son muy similares a las obtenidas por Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIS) considerando que son técnicas que se complementan muy bien para evaluar la eficiencia de inhibidores de corrosión.

El inhibidor LA-3518-C presentó el mejor comportamiento inhibidor en comparación con los otros dos inhibidores a las diferentes condiciones evaluadas de concentración de oxígeno (0 y 5 ppm) y dosificación de inhibidor (10 y 30 ppm) a la temperatura de ensayo de 80°C.

El fluido menos agresivo es el del pozo JGR-12 que contiene fisicoquímicos que favorecen el comportamiento inhibidor, mientras que el más agresivo es el del pozo CCS-A12 con el que se obtienen las menores eficiencias de inhibición, para pruebas de campo esto determinará la necesidad de aumentar la dosificación en este último.

7. RECOMENDACIONES

Se pueden implementar nuevas pruebas de eficiencia de los inhibidores en laboratorio con los fluidos de los pozos de inyección por medio de autoclave para simular el efecto que pueda tener las condiciones de presión en fondo de pozo determinando las velocidades de corrosión.

Desarrollar nuevas pruebas de laboratorio para simular ahora la eficiencia del inhibidor LA-3518-C que mostró el mejor comportamiento, ya no a condiciones extremas sino a las condiciones normales de cabeza de pozo (50°C y concentración de O₂ menores a 1 ppm) y aumentar hasta 50 ppm de concentración de inhibidor, dado que se comprobó que a condiciones extremas se tienen efectos inhibidores aceptables y se espera que la eficiencia de inhibición sea más alta a la del presente trabajo.

Realizar posteriormente prueba piloto en campo de inyección del mejor inhibidor evaluado el LA-3518-C desde las descargas de bombas de inyección efectuando seguimiento de residual en cabeza de pozo por análisis fisicoquímicos y desarrollar monitoreo en cabeza de pozo por LPR y por cupones gravimétricos, con el fin de evaluar en sitio la eficiencia de inhibición a las condiciones de proceso actuales y determinar la viabilidad económica de implementarlo en todos los pozos de inyección.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

ABD EL-LATEEF, H. M., ABU-DIEF, A. M., & MOHAMED, M. A. A. Corrosion inhibition of carbon steel pipelines by some novel Schiff base compounds during acidizing treatment of oil wells studied by electrochemical and quantum chemical methods. En: Journal of Molecular Structure. Octubre, 2016. vol. 1130, p. 522–542. [http:// dx.doi.org/10.1016/j.molstruc.2016.10.078](http://dx.doi.org/10.1016/j.molstruc.2016.10.078) ISSN: 00222860

AL-HUSSAIN, A. M., AL-ZAYER, R. M., AL-ZUBAIL, M. A., & Aramco, Field Implementation of Tar Removal using Solvent Based Chemical Treatment for Water Disposal Wells. En: SPE International. Abril 2017. S. SPE-187971-MS, p. 1–14.

AL-TAQ, A. A., AL-DAHLAN, M. N., & ALRUSTUM, A. A. Maintaining Injectivity of Disposal Wells: From Water Quality to Formation Permeability. En: SPE Middle East Oil & Gas Show and Conference. Society of Petroleum Engineers. Marzo, 2017. SPE-183743-MS, p. 1-19. <https://doi.org/10.2118/183743-MS> ISBN: 978-1-61399-504-4

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE (API). Specification for Casing and Tubing. API Spec 5CT. 9th edition, API, 2011. 91 p.

ASTM INTERNATIONAL. Standard guide for preparation of metallographic specimens. ASTM E 3 -11(2017). West Conshohocken, PA. United States. ASTM International, 2017. 12 p.

ASTM INTERNATIONAL. Standard test methods for tension testing of metallic materials. ASTM E 8/E8M – 16a. West Conshohocken, PA. United States. ASTM International, 2016. 30 p.

ASTM INTERNATIONAL. Standard test methods for determining the inclusion content of steel. ASTM E 45-18. West Conshohocken, PA. United States. ASTM International, 2018. 19 p.

ASTM INTERNATIONAL. Standard test method for microindentation hardness of materials. ASTM E 384-17. West Conshohocken, PA. United States. ASTM International, 2017. 40 p.

ASTM INTERNATIONAL. Standard Test Method for Optical Emission Vacuum Spectrometric Analysis of Carbon and Low-Alloy Steel. ASTM E 415-99a. West Conshohocken, PA. United States. ASTM International, 1999. 9 p.

ASTM INTERNATIONAL. Standard Practice for Calculation of Corrosion Rates and Related Information from Electrochemical Measurements. ASTM G 102 - 89(2015)e1. West Conshohocken, PA. United States. ASTM International, 2015. 7 p.

ASTM INTERNATIONAL. Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens. ASTM G1-03 (2017)e1. West Conshohocken, PA. United States. ASTM International, 2017. 9 p.

ASTM INTERNATIONAL. Standard Guide for Evaluating and Qualifying Oilfield and Refinery Corrosion Inhibitors in the Laboratory. ASTM G170-06(2012). West Conshohocken, PA. United States. ASTM International, 2012. 15 p.

AWAN, M. A., & AL-KHALEDI, S. M. Chemical treatments practices and philosophies in oilfields. Society of Petroleum Engineers. En: SPE International Conference and Exhibition on Oilfield Corrosion 2014: New Challenges for a New Era. Mayo, 2014. SPE-169626-MS, p. 1-14. Retrieved from <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84906498468&partnerID=40&md5=a44100983e5d1188f2d2ab285a2ea1a8> ISBN: 9781613993248

CEPSA. Informe de Monitoreo Gravimétrico en Estaciones y Pozos de los Sectores de Caracara Sur, Jaguar y Torosentado. Tecnicontrol, 2017. TC-0301-IN-I-CEP-34, 66 p.

DEYAB, M. A., EDDAHAOUI, K., ESSEHLI, R., RHADFI, T., BENMOKHTAR, S., & MELE, G. Experimental evaluation of new inorganic phosphites as corrosion inhibitors for carbon steel in saline water from oil source wells. En: Desalination, Enero, 2016. vol. 383, p. 38–45. <<https://doi.org/10.1016/j.desal.2016.01.019>>. ISSN: 00119164

EGGUM, T., TAJALLIPOUR, N., ARUMUGAM, S., & TEEVENS, P. Comprehensive Approach to Oxygen Corrosion Analysis of Water Injection Systems. En: NACE Corrosion Conference & Expo 2015. 2015. Paper No. 5962, p. 1–11.

FOLWELL, Ben, CRANE, Jhon. Incompatibility of biocides and oxygen scavengers, an overlooked corrosion risk?. En: NACE Corrosion Conference & Expo 2017. 2017 Paper No. 9060, p. 1–13. ISBN: 0773212205

GARCIA, R., VALDEZ, B., SCHORR, M., & ELIEZER, A. Green Corrosion Inhibitors for Water Systems. En: NACE Corrosion Conference & Expo 2013. 2013. Paper No. 2814, p.1–4.

INSTITUTO PARA LA INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE LOS MATERIALES. Monitoreo de corrosión mediante análisis fisicoquímico. INCITEMA. Tunja, 2017. 23 p.

JAFFER, A., FULMER, D., ENSSLEN, J., CORPORATION, B. P., & LAND, S. Recent Developments Organic Oxygen Scavenger Technology. En: NACE Corrosion Conference & Expo 2006. 2006. Paper No. 06687, p. 1–12.

MENDOZA FLORES, Juan; DURAN ROMERO, Rubén y GENESCA LLOGUERAS, Joan. Espectroscopia de Impedancia Electroquímica en Corrosión, Notas de Clase. Instituto Mexicano del Petróleo, Facultad de Química UNAM. 2012, p. 33. Disponible en internet: <<http://depa.fquim.unam.mx/labcorr/libro/Manual-EIS-IMP-UNAM.PDF>>

Princeton Applied Research. Electrochemistry and Corrosion: Overview and Techniques. En: Princeton Applied Research. Application Note CORR-4. 2000, p. 1–15. Available from internet: <https://www.ameteki.com/-/media/ameteki/download_links/documentations/library/princetonappliedresearch/application_note_corr-4.pdf?la=en>

Princeton Applied Research. Application Note AC-1. Basics of Electrochemical Impedance Spectroscopy. En: Princeton Applied Research. Application Note CORR-1. 1987, p. 1–13. Disponible en internet: <http://www.ameteki.com/media/ameteki/download_links/documentations/library/princetonappliedresearch/app_note_ac-1.pdf?la=en>

Princeton Applied Research. Basics of Corrosion Measurements. En: Princeton Applied Research. Application Note CORR-1. 1980, p. 1-13. Disponible en internet: <https://www.ameteki.com/-/media/ameteki/download_links/documentations/library/princetonappliedresearch/application_note_corr-1.pdf?la=en>

PULLAS RIVERA, D. F. Formulación Y Evaluación En Laboratorio De Un Nuevo Inhibidor De Corrosión Para Ductos En Campos Petroleros. Quito. Universidad Central del Ecuador, 2015, 80 p. Disponible en internet: <<http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/5940/1/T-UCE-0017-0145.pdf>>

SPE, G. T., & TAO, C. SPE 87045 To Improve Benefits by Injection Well Treatment. *Test*. En: SPE International. Society of Petroleum Engineers. SPE 87045. Marzo, 2014, p. 1-5

SSPC-SP 5/NACE NO. 1, Joint Surface Preparation Standard, White Metal Blast Cleaning

**ANEXO A. ESQUEMAS DE COMPLETAMIENTO DE LOS POZOS DE
INYECCION**